



EESTI MAAÜLIKOOL
Tehnikainstituut

Anti Samsonov

PLAHVATUSLEHTVORMIMISE SEADE
EXPLOSIVE FORMING DEVICE

Bakalaureusetöö
Tehnika ja tehnoloogia õppekava

Juhendaja: Heiki Lill, *MSc*

Tartu 2018

Eesti Maaülikool		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Anti Samsonov		Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia	
Pealkiri: Plahvatuslehtvormimise seade			
Lehekülgi: 60	Jooniseid: 13	Tabeleid: 8	Lisasid: 1
Õppetool: Biomajandustehnoloogiate õppetool			
Uurimisvaldkond:			
ETIS teadusvaldkond: 4. Loodusteadused ja tehnika			
ETIS teaduseriala: 4.14. Tootmistehnika ja tootmisjuhtimine			
CERCS teaduseriala: T130			
Juhendaja: Heiki Lill			
Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu, 2018			
<p>Lehtvormimine on tänapäeval metallitööstuse üks lahutamatu osa. Lehtvormimise käigus saadakse tasapinnalisest lehtmaterjalist ruumiline detail. Lehtvormimisel on erinevaid viise - nendest levinumad on vormimine pressidel, venitamine tõmbamisega, koolutamine ning plahvatuslehtvormimine. Antud bakalaureusetöö eesmärgiks on projekteerida plahvatuslehtvormimise seade, mis on kooskõlas Eesti Vabariigi seadustega, ei vaja kasutamiseks eriluba, ohutu ning praktiline. Plahvatuslehtvormimine on selline lehtvormimise protsess, mille käigus saadakse vajalik deformatsioonienergia lõhkeainet kasutades. Enne projekteerimist tutvuti asjakohase kirjandusega, mille käigus tehti selgeks antud tehnoloogia tööpõhimõte. Leiti vajalikud valemid plahvatusjõu arvutamiseks. Projekteerimist alustati lõhkeaine valikuga. Lõhkaine valikul oli tähtis jääda Eesti Vabariigi seaduste piiridesse. Neid kriteeriume rahuldada vaid üks lõhkeaine liik – püssirohi kasutades paukpadruneid. Seejärel leiti paukpadrunis oleva püssirohu mass, millest suurimat kasutati konstruktsiooni tugevusarvutustes ning vähimat lehtmaterjaliga seonduvates arvutustes. Tulemuseks õnnestus projekteerida plahvatuslehtvormimise seade, mida saab kasutada iga vähemalt 18 aastane inimene.</p>			
Märksõnad: lõhkeained, relvaseadus, ohutus, plahvatusjõud			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Bachelor's Thesis	
Author: Anti Samsonov		Speciality: Production Engineering	
Title: Explosive Forming Device			
Pages: 60	Figures: 13	Tables: 8	Appendixes: 1
Chair: Biosystems engineering Field of research: ETIS field of research: 4. Natural Sciences and Engineering ETIS scientific speciality: 4.13 Industrial Engineering and Management CERCS scientific speciality: T130 Supervisor: Heiki Lill Place and date: Tartu, 2018			
Sheet forming is inseparable part of today's metal industry. During the sheet forming process a flat sheet obtains spatial form. There are many sheet forming methods, more common are press forming, stretch forming, spinning and explosive forming. The aim of this bachelor thesis is to construct explosive forming device, which is consistent to laws of Estonian Republic, does not need any special permissions, safe and practical. Explosive forming is a sheet metal forming process, where required deformation energy is obtained by explosion. Before designing, research of appropriate literature was made to learn more about this technology. Formulas for explosion force were found. The designing started with finding right explosive. It was important not to break any laws. Only one explosive was suitable – black powder in form of blank cartridges. Later, the mass of black powder in blank cartridges was measured, from which the highest value was used in construction strength calculations and lowest for sheet metal calculations. As a result, explosive forming device was designed that any over 18 years old person can use.			
Keywords: explosives, gun law, safety, explosion force			

SISUKORD

SISUKORD	4
SISSEJUHATUS	6
1. LEHTVORMIMINE	7
1.1 Lehtvormimise olemus	7
1.2 Lehtvormimise ajalugu	7
1.3 Lehtvormimine pressidega	8
1.4 Vormimine venitamisega	10
2. PLAHVATUSLEHTVORMIMINE	11
2.1 Plahvatuslehtvormimise põhjused	11
2.2 Plahvatuslehtvormimise olemus	12
2.3 Lõhkeained	13
2.3.1 Klassifikatsioon	13
2.3.2 Tugevad lõhkeained	14
2.3.3 Nõrgad lõhkeained	15
2.4 Matriitsid	18
2.4.1 Matriitside ehitus	18
2.4.2 Matriitside materjalid	19
3. PROJEKTEERIMINE	21
3.1 Energiaallika valik	21
3.2 Üldine kontseptsioon	22
3.3 Plahvatusjõu arvutamine	23
3.3.1 Püssirohu kaalumise	23
3.3.2 Maksimaalse plahvatusjõu arvutamine	24
3.4 Surveplaadi paksuse arvutamine	26
3.5 Matriitsi hoidiku põhja ning seina paksuse arvutamine	28
3.6 Matriitsi materjal	29
3.7 Poltide läbimõõdu arvutamine	29
3.8 Arvutused vormitava lehtmetsalli kohta	30
3.9 Päästemehhanism	32
3.10 Polükarbonaadist kaitsekast	33
KOKKUVÕTE	35
KASUTATUD KIRJANDUS	36
SUMMARY	37
LISAD	38

Lisa A	39
--------------	----

SISSEJUHATUS

Lehtmaterjali vormimisel on pikk ajalugu mis ulatub tuhandete aastate taha. Lehtmaterjali valmistamine ja vormimine oli püsinud suuremate muutusteta aastasadu, kuni 17. sajandil valmistati esimene valtspink ning 19. sajandil aurupress. Kiiresti arenes nii lehtmaterjalmine kui ka metallitööstus üldiselt. Kasutusele võeti sellise paksuse ning mehaaniliste omadustega metallid, mida traditsioonilistel viisidel polnud varasemalt võimalik vormida. Leiutati uus lehtmaterjalmise viis – plahvatuslehtmaterjalmine. Selle protsessi käigus saadakse vormimiseks vajalik energia plahvatuse teel.

Antud bakalaureusetöö eesmärgiks on projekteerida ning valmis ehitada plahvatuslehtmaterjalmise seade, mis on kooskõlas Eesti Vabariigi seadustega, ei vaja kasutamiseks erilubasid, on ohutu ning praktiline. Teema valiti, kuna Eesti Maaülikooli tehnikainstituudil puudub sarnane seade ning autorile pakub teema huvi. Valmis ehitatud seade jääb Eesti Maaülikooli tehnikainstituudile ning seda saab kasutada nii õppetöös kui ka messidel/näitustel tehnikainstituudi reklaamimisel.

Eesmärgi saavutamiseks tuli lahendada järgnevad ülesanded:

- 1) tutvuda teemakohase kirjandusega;
- 2) valida sobilik lõhkeaine ning selle vorm;
- 3) arvutada plahvatusjõud;
- 4) valida sobilikud materjalid;
- 5) teostada tugevusarvutused lähtuvalt plahvatusjõust;
- 6) koostada joonised;

Töö esimeses osas antakse ülevaade lehtmaterjalmise ajaloost ning alternatiivsetest lehtmaterjalmise viisidest. Teises osas tutvustatakse plahvatuslehtmaterjalmist ning kolmandas osas teostatakse seadme projekteerimine.

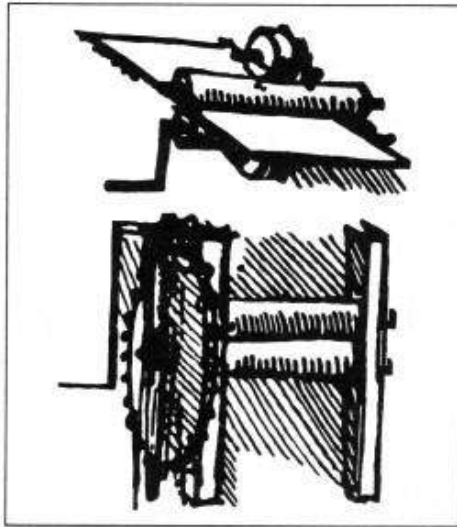
1. LEHTVORMIMINE

1.1 Lehtvormimise olemus

Lehtvormimisprotsessid saab liigitada kahte gruppi: eraldusoperatsioonid ning kujumuute- ehk vormimisoperatsioonid. Eraldusoperatsioonide käigus eraldatakse tooriku üks osa teisest etteantud kontuuri mööda, vormimisoperatsioonide käigus antakse tasapinnalisele toorikule plastseid deformatsioone kasutades ruumiline vorm. Lehtvormimise käigus on lähtematerjaliks alati leht- või lintmetall. Lehtvormimisel lähtetooriku paksus töötlemise käigus tavaliselt ei muutu ning töötlemine toimub külmalt. [1]

1.2 Lehtvormimise ajalugu

Lehtmetalli vormimiseks on tarvis lehtmetalli. Esimest täpset lehtmetalli valmistamise aega ajaloolased välja tuua ei suuda. Arvatakse, et esimesed metallist lehed olid valmistatud kullast ning hõbedast külmtöötlemise (sepistamise) käigus juba enne meie aja arvamist. Selliseid lehti kasutati peamiselt ehete valmistamiseks. Pöördepunkt lehtmetalli valmistamises toimus valtspingi leiutamisega. Esimesed valtspingi joonised pärinevad 1480. aastast ning autoriks on Leonardo di ser Piero da Vinci, laiale maailmale rohkem tuntud nimega Leonardo da Vinci [2]. Seadme (joonis 1) tööseadisteks on kaks silindrilist rulli mille vahelt lasti läbi külmtöödeldav materjal (tina ning plii). Tulemuseks oli ühtlase paksusega lehtmaterjal. Tõendeid, et antud seade sellel ajal valmis ehitati pole.



Joonis 1. Leonardo da Vinci valtspingi eskiis [2].

Esimene tööstuslik valtspink ehitati ning võeti kasutusele 1615. aastal. Seadet kasutati tinast ning pliist lehtede saamiseks. Alates sellest ajast hakkas toimuma kiire valtspinkide areng - suudeti ehitada suuremaid ning tootlikkumaid valtspinke. 18. sajandil hakati sarnase tehnoloogiaga tootma ka eriprofiilseid tooteid – ümaraid ning kandilisi vardaid, relse ning T-talaseid. 1851. aastal toodeti juba 6 meetri pikkuseid, 1 meetri laiuseid ning 11 mm paksuseid metallist plaate. [2]

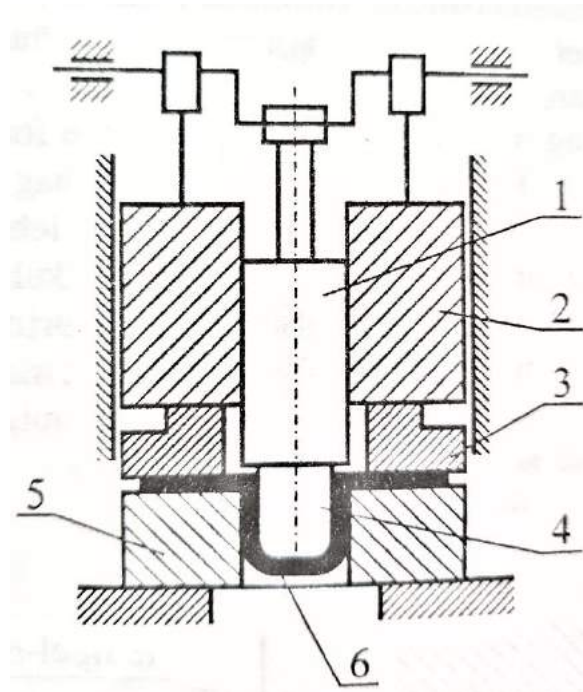
Enne valtspingi kasutuselevõttu vormiti lehtmaterjali haamerdamise teel. Tänapäeval kasutavad sama tehnoloogiat vaid sepad. Lehtmaterjal asetati puidust või metallist vormile misjärel haamerdati lehtmaterjali kuni see saavutas vajaliku kuju. Protsess on aeganõudev ning tulemus sõltub palju sepa oskustest. [2]

1.3 Lehtvormimine pressidega

Lehtvormimine pressidel on kõige levinum lehvormimise viis. See sai alguse 19. sajandi alguses aurupressi leiutamisega. Sügavtõmbamine leiutati 19. sajandi lõpus ning kasutati peamiselt laskemoona hüllside valmistamiseks. [2]

Tänapäeval kasutatakse kahte eri liiki presse: mehhaanilisi ning hüdropresse. Mehhaanilised pressid on kindla käigupikkusega ning on suure käikude arvuga – 100...2000 käiku minutis. Hüdropressid on seevastu väiksema käikude arvuga kuid võimaldavad saada suuremaid survejõude ning käiguulatusi. Mehhaanilise pressi põhimõtteskeem on toodud joonisel 2.

Hüdropressi tööpõhimõte on sama mis mehhaanilisel pressil, erisuseks on see, et süvistustemplit liigutatakse hüdrosilindri abil. [1]



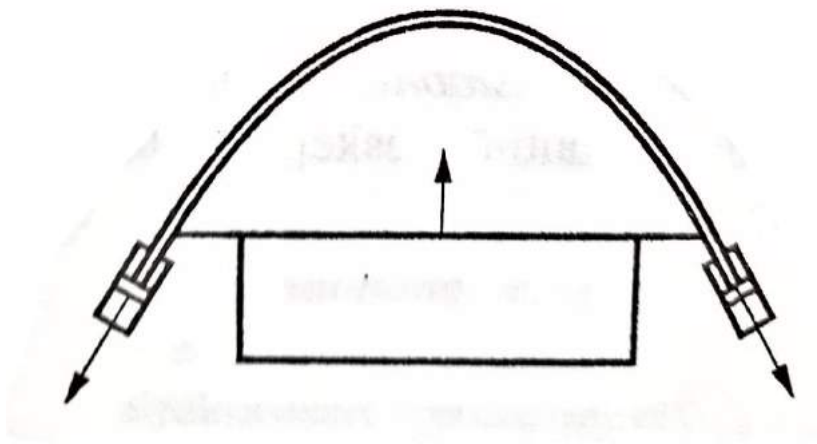
Joonis 2. Mehaanilise pressi põhimõtteskeem: 1 – sisemine liugur; 2 – välimine liugur; 3 – surverõngas; 4 – süvistustempel; 5 – sügavtõmbematriits; 6 – toode. [1]

Joonisel 2 on tegemist sügavtõmbamisega. Sügavtõmbematriitsile on asetatud toorik, millele rakendatakse süvistustempliga survet. Kui tekknud pinge toorikus ületab voolepinge, hakkab toorik deformeeruma. Et tooriku äärikule ei tekiks volte surutakse toorikut surverõngaga vastu matriitsi. Tulemuseks on silindriline õõneskeha.

Tänapäeval kasutatakse sellist lehtvormimise tehnoloogiat autokere detailide, gaasiballoonide, olmetehnika detailide ja paljude muude detailide valmistamiseks.

1.4 Vormimine venitamisega

Vormimine venitusega on saanud alguse lennukitööstuses. Selle suurimaks eeliseks on suurte detailide vormimise võimalus, puuduseks aga väike tootlikkus. Venitusega vormimisel tekitatakse toorikus tõmbepinged, mis ületavad materjali voolavuspiiri. Selle tulemusena jäävad toorikusse jäävad tõmbedeformatsioonid 1...4% piires, mis on täiesti piisav et toorik säilitaks vajaliku vormi [1]. Joonisel 3 on kujutatud tõmbamine venitamisega.



Joonis 3. Tõmbamine venitamisega. [1]

Joonisel 3 on toorik ottest fikseeritud. Matriits liigub üles ning tekitab toorikus jäävaid tõmbedeformatsioone. Võrreldes lehtvormimisega pressidel on vormimine venitamisega odavam, jõud on 70% väiksemad ning üleminek ühe toote vormimiselt teisele kiire. Suurimaks puuduseks on teravate nurkade saamise võimatus. [1]

2. PLAHVATUSLEHTVORMIMINE

2.1 Plahvatuslehtvormimise põhjused

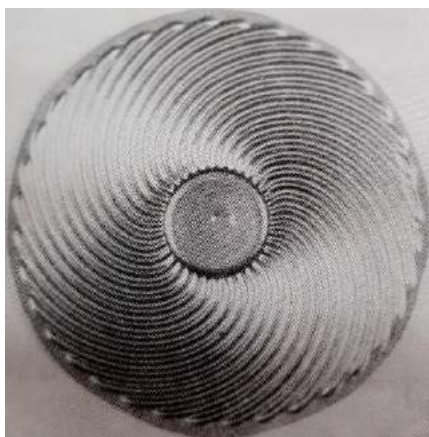
Esimene patent plahvatuslega stantsimiseks võeti 1898. aastal Inglismaal. Enne seda kasutas Charles Monroe 1888. aastal pressitud püroksüliini rauast plaatide graveerimisel. Suurim areng plahvatuslega stantsimisel toimus 1950. aastatel tänu lennuki- ning raketitööstusele. Tarvis oli valmistada suuremõõtmelisi ning kumeraid detaile, mida tavaliste pressidega oleks olnud võimatu teha või oleks see olnud liiga kallis. Näiteks valmistas Ryan Aeronautical 1950 – 1960. aastatel lennukikere detaile, mille diameeter oli 12 meetrit ning mille raudebetoonist matriits kaalus 44 tonni. Samuti võimaldab plahvatuslega stantsimine saada suure täpsusega detaile. Tabelis 1 on välja toodud Aerojet General Corporation raketite kütusemahutite põhjade lubatud ning võimalikud piirhälbed põhja diameetriga 137 cm ning paksusega 3,2 mm. [3]

Tabel 1. Raketite kütusemahutite põhjade piirhälbed [3].

Mõõde	Piirhälbed, mm	
	lubatud	võimalikud
Diameeter	$\pm 0,25$	$\pm 0,13$
Kontuur	$\pm 0,50$	$\pm 0,25$
Paksus	$\pm 0,10^1$	$\pm 0,05^1$

Märkus. Tähis „1“ tähendab, et vastava tulemuse saamiseks on tarvis teostada eelnev pinnatöötlus.

Plahvatuslega stantsiti ka väiksemaid detaile pindalaga 5 – 10 cm². Joonisel 4 on kujutatud reaktiivmootori kütusefiltri üks osadest.



Joonis 4. Reaktiivmootori kütusefiltri detail [3]

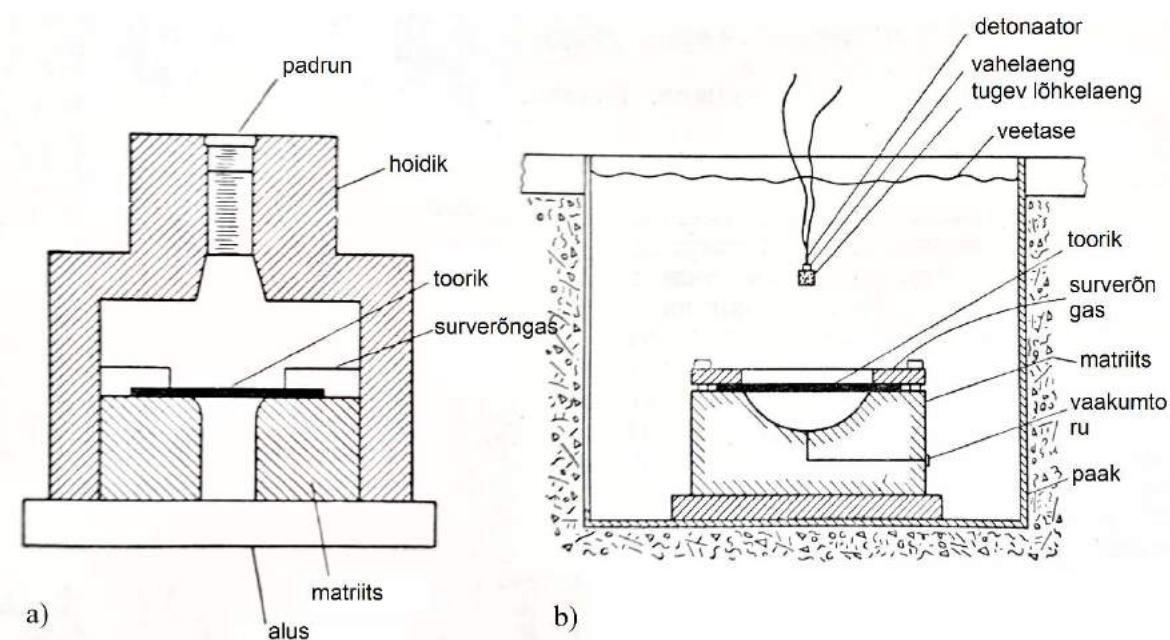
Antud detaili läbimõõt on 50 mm, paksus 0,13 mm ning valmistatud roostevabast terasest 302. Vormimiseks kulus 1,3 grammi lõhkeainet. [3]

2.2 Plahvatuslehtvormimise olemus

Plahvatuslehtvormimine toimub ülisuurtel kiirustel, kogu deformatsiooniprotsess võtab aega kuni 40 ms, ning liigitub suure deformatsioonienergiaga lehtstantsimise alla. Plahvatuslega stantsimise suurimateks eelisteks on vormitava detaili suuruse ning paksuse piirangute puudumine. Samuti on võimalik stantsida sulameid, mille lehtstantsimine pressidel oleks problemaatiline. Tänu suurele deformatsioonikiirusele puuduvad materjalis elastsed järelmõjud. [1]

Plahvatuslehtvormimine liigitub lõhkelaengu asetuse järgi kaheks kategooriaks. Esimese puhul asetatakse lõhkelaeng tooriku pinnale (kontaktoperatsioon) ning teisel juhul asetatakse lõhkelaeng toorikust mingile vahekaugusele (distantoperatsioon) mispuhul toimub energia ülekanne tooriku ja lõhkelaengu vahel oleva keskkonna kaudu (õhk/gaas, vesi, õli). Kontaktoperatsioonid on keevitamine, lõikamine ning pulbrite pressimine. Distantoperatsioone kasutatakse kujumuutmiseks. Mõlemad protsessid erinevad üksteisest tekkiva rõhu poolest tooriku pinnal ning järgneval materjali omaduste muutumisel. Rõhk tooriku pinnal olenevalt protsessist võib olla vahemikus $100 - 500000 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$. [3]

Tüüpiline plahvatuslehtvormimise süsteem koosneb neljas osast: 1) lõhkelaengust, 2) keskkonnast, mis kannab edasi energiat, 3) press-vormist (matriits), 4) toorikust. Paljudel süsteemidel on juures ka lisavarustus, milleks võib olla veepaak, kompressor ning vaakumpump. Kasutatakse reeglina kahte erinevat süsteemi: kinnine ning veealune (lahtine) süsteem (joonis 5). Kinnise süsteemi puhul on energiaallikaks tavaliselt püssirohi. Püssirohu põlemisel gaaside maht kinnises ruumis suureneb, rõhk tõuseb ning gaasid suruvad tooriku vastu matriitsi, saades vajaliku kuju. Veealuse süsteemi puhul kinnitatakse toorik matriitsile paagist väljaspool. Kui toorik on matriitsile kinnitatud, tekitatakse tooriku ja matriitsi vahel vaakum, seejärel asetatakse matriits paaki vee alla. Tooriku keskele asetatud lõhkelaeng initsieeritakse, tekkiv lööklaine surub tooriku vastu matriitsi. [3]



Joonis 5. a) kinnine süsteem, b) lahtine süsteem.

Mõlemaid süsteeme on võimalik kasutada ka torude kalibreerimiseks, sel juhul koosneb maatriks kahest lahtivõetavast osast.

2.3 Lõhkeained

2.3.1 Klassifikatsioon

Lõhkeained kuuluvad materjalide hulka, milles toimuvad kiired keemilised reaktsioonid mille käigus eraldub suures koguses gaase ning soojust. Oleku poolest eristatakse gaasilisi (hapniku ja atsetüleen segu), vedelaid (nitroglütseriin) ja tahkeid (trinitrotolueen) lõhkeaineid. Reaktsiooni järgi eristatakse nõrku ja tugevaid lõhkeaineid. Nõrkades lõhkainetes kulgeb põlemine välimistest kihtidest sisemiste kihtide suuna kiirusega mõni sentimeeter sekundis. Gaaside eraldumisel ei teki märkimisväärselt kõrgeid rõhkusid. See on suhteliselt aeglane protsess võrreldes tugevate lõhekainetega, mille puhul põlemine toimub kiirustel $1500...7500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. [3]

2.3.2 Tugevad lõhkeained

Tugevad lõhkeained jaotuvad kahte kategooriasse: initsieerivad lõhkeained ja sekundaarsed lõhkeained. Initsieerivad lõhkeained on äärmiselt tundlikud ning detoneerivad kergelt kuumutamiseks. Kuumutamiseks kasutatakse enamasti süütenööri. Sekundaarsed lõhkeained on seevastu vähem tundlikud ning taluvad kõrgeid temperatuure ning lööke. Sekundaarsete lõhkeainete detoneerimiseks on tarvis väga tugevat lööki või suurt ning kiiret rõhumuutust. See saavutatakse initsieerivate lõhkeainete kasutamisega. Plahvatuses stantsimisel kasutatakse sekundaarseid lõhkeained, mille kogus on täpselt välja arvutatud. Enimkasutatavd sekundaarsed lõhkeained koos nendest eralduva energia ja gaaside hulga on välja toodud tabelis 2. [3]

Tabel 2. Enimkasutatavate sekundaarsete lõhkeainete detoneerimisel eralduvad energia ja gaaside hulgad [3]

Lõhkeaine	Energia, cal·g ⁻¹	Gaasid cm ³ ·g ⁻¹
Ammooniumnitraat	346	980
Etüleen dinitramiin	1276	908
Nitroglütseriin	1486	715
Pentriit	1385	790
Pikriinhape	1000	675
Tsükloniit	1300	908
Tetrüül	1120	760
Trinitrotolueen (trotüül)	925	730

Plahvatusel tekkiv rõhk ei ole kuidagi seotud eralduvate gaaside hulga. Katseliselt on kindlaks tehtud, et plahvatusel tekkivat rõhku mõjutab kõige rohkem detonatsioonikiirus ning lõhkeaine tihedus. Tugevate lõhkeainete puhul on tekkiv rõhk arvutatav valemiga 1 [3].

$$P = \frac{V^2 \cdot \rho_0 \cdot (\rho - \rho_0)}{\rho}, \quad (1)$$

kus P - tekkiv rõhk kg·cm⁻²;

V - detonatsioonikiirus m·s⁻¹;

ρ_0 - lõhkeaine tihedus g·cm⁻³;

ρ - gaaside tihedus (ca 30% kõrgem ρ_0 -st) g·cm⁻³.

Tugevaid lõhkeained kasutatakse peamiselt avatud süsteemides. Nii lõhkeaine kui ka selle füüsiline vorm valitakse vastavalt operatsiooni tüübile, vormile, suurusele ja tooriku materjalile. Lõhkeainete erinevad tüübid vastavalt operatsioonile on toodud tabelis 3.

Tabel 3. Lõhkeainete tüübid vastavalt operatsioonile [3]

Operatsioon	Lõhkeaine füüsiline vorm
Torude kalibreerimine	plastiline triip, käsitsi vormitav plastiline mass, valatud plokk, pressitud plokk, detoneeriv nõör
Sügavtõmbamine	plastiline triip, käsitsi vormitav plastiline mass, valatud plokk, pressitud plokk, detoneeriv nõör, želeetaoline, vedel
Paneelide stantsimine	plastiline triip, detoneeriv nõör
Ääristamine	plastiline triip, valatud plokk, pressitud plokk

Tabelist 3 on näha, et kõige enimkasutatav lõhkeaine vorm on plastiline triip. Põhjuseks on antud vormi hea omadus saavutada sobiv kuju kas rõnga, S-, L-, U- või mõne muu kuju näol. Plastilise triibu all mõeldakse plastilist lõhkeainet, mis on vormitud triibu kujuliseks.

2.3.3 Nõrgad lõhkeained

Nõrkade lõhkeainete kategooriasse kuuluvad püssirohulaadsed ained. Püssirohi koosneb kolmest erinevast ainest. Esimene püssirohi koosnes süsist, väävlist ja kaaliumnitraadist vastava suhega 3:2:15. Selline püssirohi tekitab põlemisel palju suitsu ning tahkeid korrosioonilise toimega aineid. Tänapäeval on kasutuses kahte tüüpi püssirohtu: ühe ja kahekomponendilised. Ühekomponendilise püssirohu peamiseks komponendiks on nitrotselluloos (püroksüliin), vähesel määral lisatakse hürdoskoopsuse vähendamiseks dinitrotolueeni ja dibutüülfalaati. Ühekomponendiline püssirohi põleb hästi kõrgetel rõhkudel 700-3000 kg·cm⁻² kuid ebapüsivalt madalamatel rõhkudel. Kahekomponendiline püssirohi koosneb peaaegu võrdsetest kogustest nitrotselluloosist ja nitroglütseriinist. Kasutatakse madalamatel rõhkudel miinipildujates, haubitsates ja raketites. Ühe- ja kahekomponendiliste püssirohtude omadused on välja toodud tabelis 4. [3]

Tabel 4. Enimkasutatavate püssirohtude põlemisel eralduvad energia ja gaaside hulgad [3]

Püssirohi	Tüüp	Energia, cal·g ⁻¹	Gaasid, cm ³ ·g ⁻¹
Suurtüki (püroksüliin-nitrotselluloos)	ühekomponendiline	875	955
Suurtüki (nitrotselluloos, mittehüdrokoopne)	ühekomponendiline	765	978
Suurtüki (nitrotselluloos, leegita, mittehüdrokoopne)	ühekomponendiline	740	1005
Kordiit M.D	kahekomponendiline	1025	940
Kordiit W.M	kahekomponendiline	1013	934
Kordiit S.C	kahekomponendiline	970	957
Kordiit N.Q	kahekomponendiline	880	1001
Kordiit N	kahekomponendiline	765	1058

Püssirohud põlevad ühtlase kiirusega väljastpoolt sisse risti pinnaga. Põlemise kiirus võib kõikuda vahemikus 2,5-250 mm·s⁻¹ ning see sõltub põleva pinna peal oleva gaasi rõhust, veel põlemata püssirohu temperatuurist, eralduvate gaaside liikumiskiirusest ning püssirohu koostisest. Suurimat mõju põlemise kiirusele omab rõhk, seos on lineaarne ning väljendub alljärgneva valemiga. [3]

$$V = B \cdot P, \quad (2)$$

kus V – põlemise kiirus cm·s⁻¹;

B – konstant 8·10⁻³ cm³·kg⁻¹·s⁻¹;

P – rõhk kg·cm⁻².

Rõhu sõltuvust põlemise kiirusele kasutatakse ära kahurites ning rakettides vajalike karakteristikute saamiseks.

Püssirohu põlemisel eralduvad gaasid ning kõrge temperatuur tekitavad kinnises anumas kõrge rõhu. Katseliselt on kindlaks tehtud, et põlemisel tekkiv rõhk sõltub kõige rohkem püssirohu massi ja kinnise anuma ruumala suhtest, kusjuures püssirohu koostis, terade suurus ning reaktsiooni temperatuur ei oma olulist tähtsust. Maksimaalse rõhu sõltuvus püssirohu massi ja anuma ruumala suhtest on välja toodud joonisel 6. Sõltuvus on eksponentsiaalne ning leitav järgneva valemiga. [3]

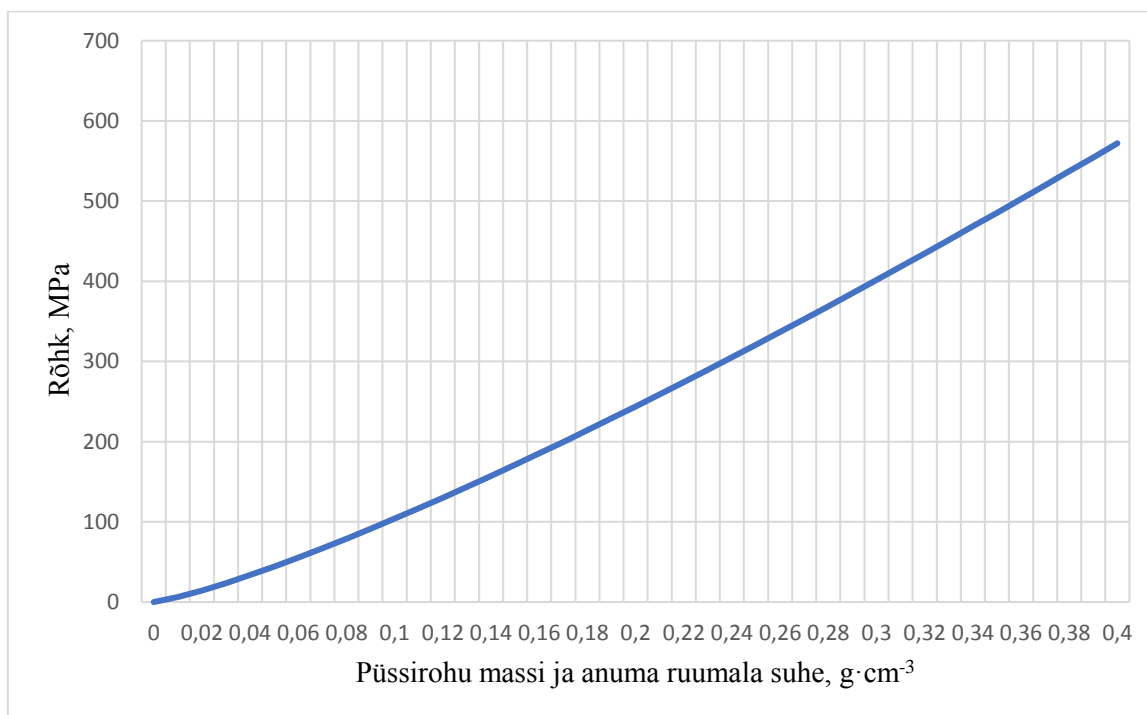
$$P_{max} = 1765,8 \cdot \left(\frac{m_p}{V}\right)^{1,23} \quad (3)$$

kus P_{max} – maksimaalne tekkiv rõhk MPa;

m_p – püssirohu mass g;

V – anuma ruumala cm^3 .

Valemi 3 põhjal saab väga täpselt hinnata maksimaalset rõhku kõikide tavaliste püssirohtude puhul.



Joonis 6. Rõhu sõltuvus püssirohu massi ja anuma ruumala suhtest.

Kinniste süsteemide puhul kasutatakse püssirohtu koos sütikuga või paukpadruneid. Esimese variandi puhul asetatakse püssirohi koos sütikuga kilekoti sisse – püssirohu koguse muutmine on sellisel juhul kerge. Paukpadruni puhul tuleb vajaliku enegiaga padrun kas osta või ise laadida. Erineva energiahulga saamiseks kasutatakse eri kaliibriga paukpadruneid. Püssirohu ja sütiku kombinatsiooni puhul pole püssirohu kogus piiratud, paukpadrunite puhul on piiravaks faktoriks hülsi mõõtmete suur kasv.

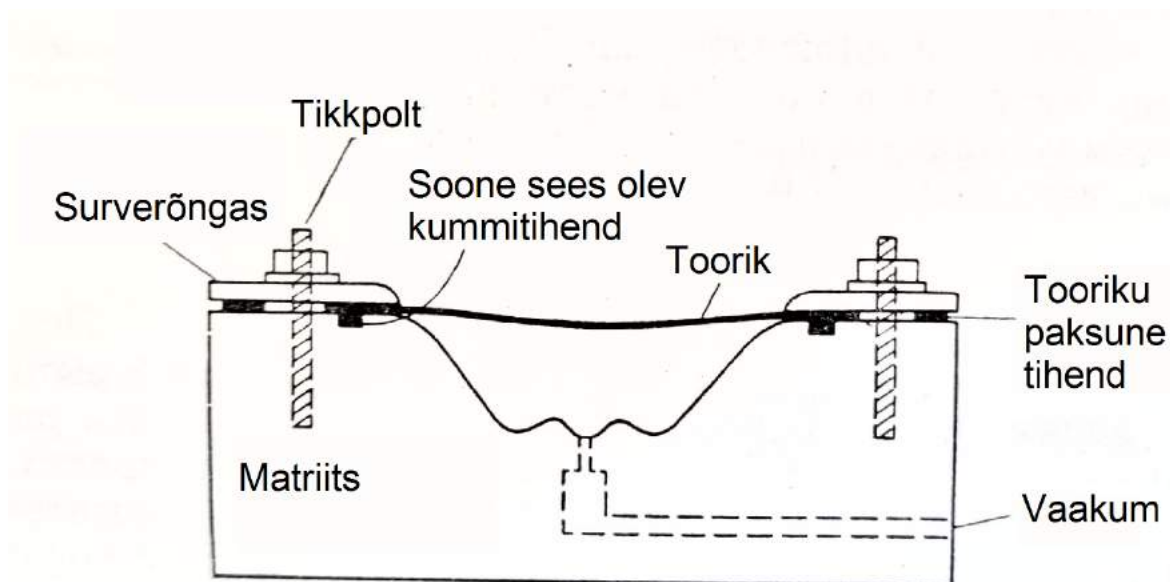
2.4 Matriitsid

2.4.1 Matriitside ehitus

Plahvatuslega stantsimise juures on kõige olulisem roll matriitsil – sellest sõltub toote kuju ning kvaliteet. Sellest tulenevalt moodustavad matriitsid suurema osa kulutustest. Avatud ja kinniste süsteemide puhul erinevad matriitside ehitused vähesel määral.

Avatud süsteemide matriitse leidub igas suuruses. Valmistatakse matriitse läbiõõduga alates mõnikümmend sentimeetrit ning lõpetades paarikümne meetriga [3]. Avatud ja kinniste süsteemide matriitside peamine erinevus on nende suuruse vahe.

Avatud süsteemiga plahvatuslehtvormimisel toimub tooriku surumine matriitsi vees tekkinud suure rõhu abil [3]. Matriitsi ehitust on näha joonisel 7.



Joonis 7. Matriitsi ehitust kujutav joonis [3].

Tooriku ning matriitsi vahel on gaasiline keskkond, et sinna ei satuks kuidagi vett asetatakse tooriku ja matriitsi vahele kummist tihend või spetsiaalne madala viskoossusega määrdeaine. Seejärel asetatakse matriitsile surverõngas, mille abil surutakse tooriku ääred vastu matriitsi. Samuti, kui lööklaine surub toorikut matriitsi õõnde, õõnsuse ruumala väheneb ning rõhk tõuseb. Selline nähtus võib tekitada kahte ebameeldivat efekti. Esimeseks, kokkusurutud gaasid ei lase toorikul puutuda matriitsi pinda ning toorik ei saavuta vajalikku kuju. Teiseks, kuna tooriku deformatsioon toimub ülisuurel kiirusel kuumenevad gaasid kokkusurumisel kõrge temperatuurini, mis võib olenevalt matriitsi materjalist kahjustada matriitsi pinda.

Selle vältimiseks tuleb matriitsi kõige sügavamatesse kohtadesse puurida augud gaaside eemaldumise tarvis. Avatud süsteemide puhul tekitatakse tooriku ja matriitsi vahele vaakum. Vaakumi säilitamiseks on kaks moodust. Esimese puhul asub matriitsil klapp, mis pärast vaakumi tekitamist suletakse. Teisel juhul jäävad vaakumsüsteemi torud kogu vormimise ajaks matriitsi külge kinnitatuks ning gaaside eemaldamine toimub pidevalt. [3]

Kinniste süsteemide puhul tooriku ja matriitsi vahele vaakumit ei tekitata. Sellisel juhul väljuvad gaasid õõnsusest omal jõul. Erinevus avatud süsteemidega seisneb selles, et kinniste süsteemide puhul tuleb väljalaskeavasid teha mitu ning nende arv sõltub õõnsuse ruumalast. Mõningatel juhtudel ei kasutata kinniste süsteemide puhul surverõngaid, vaid neid asendavad matriitsi vastu asetatavad katted, mis suruvad tooriku vastu matriitsi tekitades tooriku ja katte vahele hermeetilise ruumi. Kusjuures tooriku ja matriitsi vahel sellisel juhul tihendit olema ei pea. Katteid surutakse silindri, poltide või mõne muu turvalise tehnilise lahendusega kindlalt vastu matriitsi. [3]

2.4.2 Matriitside materjalid

Matriitside valmistamisel kasutatakse erisuguse tugevusega materjale – alates suure tugevusega tööriistaterastest rabeda betooni ja vähem tugevamate puidu ning polümeerideni. Valmistatava matriitsi materjal sõltub vormitava materjali omadustest, paksusest, vormi kujust (raadius, sügavus, soonte olemasolu), lubatud piirhälvetest, detailide valmistamise arvust ning lõhkelaengu tüübist. Nõrgematest materjalidest valmistatud matriitse kasutatakse väikeste arvu detailide puhul, kus nõutav täpsus ei oma olulist rolli. Seeriatootmises tuleb kasutada kõrgema tugevusomadustega materjale – tööriistateras või malm. Matriitside enimkasutatavad valmistusmaterjalid vastavalt vormitavate detailide arvule on toodud tabelis 5. [3-4]

Tabel 5. Matriitsi valmistusmaterjalid vastavalt vormitavate detailide arvu puhul [3]

Toodete arv	Matriitsi valmistusmaterjalid vastavalt sügavtõmmatava materjali voolepiirile		
	65 – 190 MPa	191 - 410 MPa	≥411 MPa
1 - 10	epoksüvaik	kirksite	malm
11 - 20	kirksite	kirksite	malm
21 - 100	kirksite	malm	malm

Polümeermaterjalist ja kirksitist (ZnAl_4Cu_3) valmistatud matriitse kasutatakse kergemates tingimustes stantsimiseks; tööriistateraseid ning madala süsinikusisaldusega teraseid kasutatakse keskmiste koormuste puhul ning kõrgete koormuste korral kasutatakse eriti kõrge löögisitkusega teraseid. Reeglina peab seeriatootmise korral olema matriitsi valmistusmaterjali voolavuspiir kõrgem vormitava materjali voolavuspiirist. Matriitside valmistusmaterjalid vastavalt kasutuskeskkonnale on välja toodud tabelis 6. [3]

Tabel 6. Matriitside materjal vastavalt kasutusvaldkonnale [3]

Matriitsi materjal	Kasutusvaldkond
Betoon	madal rõhk ja suured detailid
Pehme raud	kõrge rõhk ja seeriatootmine
Betoon ja epoksüvaik	kõrge rõhk ja suured detailid
Betoon ja klaaskiud	kõrge rõhk ja suured detailid
Kirksite ja klaaskiud	madal rõhk ja vähe detaile
Kirksite	madal rõhk ja vähe detaile

Materjaline ainult betooni matriitsi valmistamiseks kasutatakse vähe. Seda tulenevalt asjaolust, et valatud betooni puhul on raske saavutada pinda, millel pole õhumulle ning tulenevalt betooni poorsusest on keeruline hoida matriitsi ja tooriku vahel vaakumit. Samuti ei talu betoon hästi lööke. Et betoonkonstruktsiooni tugevdada kasutatakse armatuuri, epoksüvaiku või klaaskiudu. Betoon valatakse eelnevalt valmistatud armatuurisõrestiku sisse. Peale betooni tahkumist kaetakse betooni pind kas epoksüvaigu või klaaskiuga. Saadud pind leevendab lööke ning ei ole nii poorne kui betoon, mistõttu on vaakumi tekitamine matriitsi ja tooriku vahel tehniliselt lihtsam. [3]

Pehme raud on plahvatuslehtvormimise jaoks parim matriitsi materjal. Raud ei tihene surve all ning peab väga hästi vastu löökidele, mis tekivad plahvatuse käigus. Samuti on metalli poorsus väga väike, seega on selle materjali puhul lihtne tekitada ja hoida vakkumit. [3]

3. PROJEKTEERIMINE

3.1 Energiaallika valik

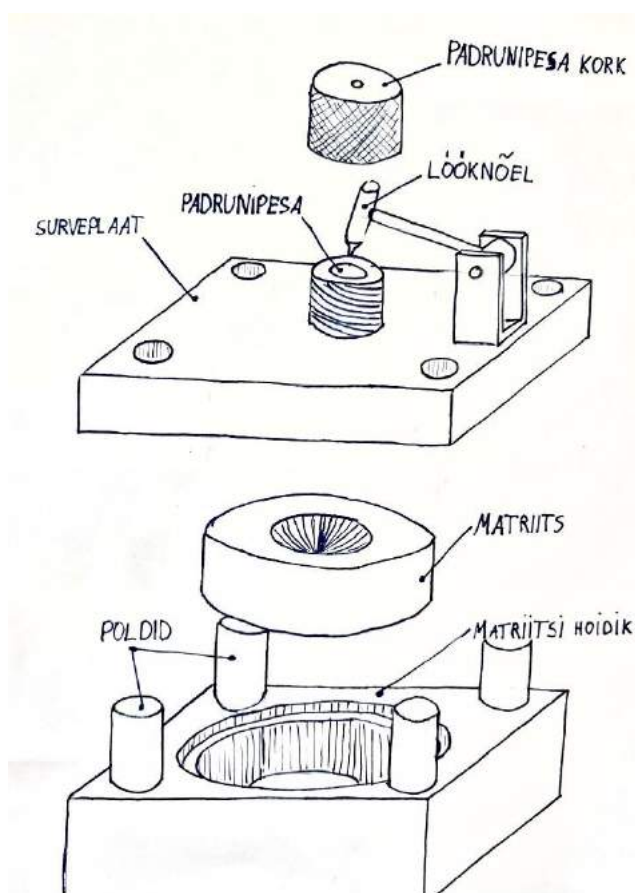
Peatükis 2.3 välja toodud lõhkeainetest sobib antud projekti jaoks kõige paremini püssirohi, kuna seda kasutatakse peamiselt kinniste süsteemide puhul, milleks on ka projekteeritav seade.

Eesti Vabariigis kehtiva „Lõhkematerjaliseaduses“ § 42 lõike 1 kohaselt võib lõhkematerjale kasutada lõhkematerjalisektori ettevõtja, kellel on asjakohane käitlemisluba ning nõuetele vastavad lõhkajad [4]. Samuti „Lõhkematerjali valmistamise, hoidmise ja kasutamise ohutuseeskiri“ punkt 12 järgi võib lõhkaja teha ainult selliseid lõhketöid, mille tegemiseks on talle omistatud kvalifikatsioon ja vastav sissekanne tehtud kutsetunnistusele [5]. Selliste tööde alla kuulub ka lõhketöö metalli töötlemisel ja purustamisel. Antud seadme projekteerimise üks eesmärkidest on, et plahvatuslehtvormimise seadme kasutaja ei peaks omama eriluba, seda nii seadme kasutamisel kui ka püssirohu hoiustamisel. „Relvaseadus“ § 46 lõike 5 punkti 6 alusel tohib relvaluba omav isik hoida kuni 1 kg püssirohtu iga tulirelva kohta, kuid kokku mitte üle 5 kg [6]. See tähendab, et omamata eeltoodud lubasid, ei tohi isik püssirohtu omada. Tuleb märkida, et siin on mõeldud püssirohtu, mis ei ole laetud padrunites. Samuti kehtib piirang laskemoona hoidmise koguse kohta. „Relvaseaduse“ § 46 lõike 5 alusel tohib relvaluba omav isik hoida kuni 100 püstoli- või revolvrripadrunit, kuni 100 gaasirelvapadrunit, kuni 300 padrunit iga vintraudse jahirelva kohta, kuni 300 padrunit iga sileraudse jahirelva kohta, kuni 1000 padrunit iga sporditulirelva kohta ning kuni 1000 sütikut [6]. Ainuke, millele puuduvad seadusest tulenevad piirangud on paukpadrunid. Paukpadrun ei kuulu laskemoona alla ning seega selle omamine on reguleeritud „Relvaseadus“ § 18 „Piiratud tsiviilkäibega relvad ja laskemoon“ lõike 2 ja 4 alusel. Lõike 2 järgi piiramata tsiviilkäibega padrunikomponendid on kuulid, haavlid ja padrunikestad [6]. Kuna paukpadrun on olemuselt padrunikest, mille sees on püssirohi, pole selle omamise kogus reguleeritud. Lõike 4 järgi ei või piiramata tsiviilkäibega relva ega selle laskemoona soetada, omada, vallata, kanda, hoida ega edasi toimetada alla 18-aastane isik [6]. Seega on ainukeseks piiravaks asjaoluks seadme kasutaja vanus, mis ei tohi olla 18 aasta.

Antud töö raames valiti ettevõtte Umarex paukpadrunid Titan kaliibriga 9x22 mm [7]. Antud paukpadrunid said valitud, kuna need on turul saadaolevatest kõige suurema kaliibriga ning on laialt levinud.

3.2 Üldine kontseptsioon

Projekteerimise lihtsustamiseks koostati plahvatuslehtvormimise seadme esialgne skits, millel on välja toodud seadme põhiosad. Skitsi on näha joonisel 8.



Joonis 8. Plahvatuslehtvormimise seadme skits

Projekteeritav seade koosneb kolmest põhiosast: matriitsi hoidikust, matriitsist ning surveplaadist. Matriitsi hoidikus on ava matriitsi jaoks. Antud töö käigus valmistatakse matriits puidust, kuna puit on suhteliselt odav võrreldes teiste materjalidega ning seda on kerge töödelda. Sellist matriitsi hoidiku ning matriitsi süsteemi kasutatakse sellepärast, et nii on kergem ning odavam minna ühe kujuga detaili valmistamiselt üle teise kujuga detaili valmistamisele. Jooniselt 8 on näha, et matriitsi hoidikus on olemas aste. Matriits laskub astmega samale tasapinnale, mille peale hiljem asetatakse toorik. Seejärel asetatakse tooriku ning matriitsi hoidiku peale surveplaat, mis surub tooriku ääred vastu matriitsi hoidiku astet, tekitades tooriku ja surveplaadi vahele hermeetilise ruumi. Surveplaad kinnitatakse matriitsi hoidiku külge nelja poldi ja mutri abil. Surveplaadi ülemise osa keskel asub padrunipesa, millesse asetatakse paukpadrun. Pärast paukpadruni asetamist padrunipesasse keeratakse

padrunipesa peale kork, mis ei lase padrunil pesast välja tulla. Paukpadrun initseeritakse pendelvasaraga, mille otsas on lööknõel. Järgneva projekteerimise käigus tuleb leida surveplaadi paksus, matriitsi hoidiku põhja ja külgliseinte paksus ning poltide läbimõõdud.

3.3 Plahvatusjõu arvutamine

3.3.1 Püssirohu kaalumine

Selleks, et teostada tugevusarvutusi on tarvis teada saada kui suure rõhu suudab paukpadrunis olev püssirohi tekitada. Valemi 3 järgi on püssirohu mass üks komponentidest, mis mõjutab rõhku. Seega on vaja leida paukpadrunis oleva püssirohu mass. Tootja pole püssirohu massi karbile kandnud, samuti pole andmeid püssirohu koguse kohta paukpadrunis tootja koduleheküljel. Et leida püssirohu mass paukpadrunis tuleb seda vahetult kaaluda. Kaalumiseks kasutati Mettler Toledo ME204 kaalu mõõtepiirkonnaga 0-220 g ning täpsusega 0,0001 g. Et padrunites oleva püssirohu mass teada saada, tuli paukpadruni otsas olev plastist kaitse lahti lõigata ja painutada ning püssirohi kestast välja raputada. Paukpadruni plastikust kaitse enne ning pärast lahtilõikamist on näha joonisel 9.



Joonis 9. Paukpadruni plastikust kaitse enne ning pärast lahtilõikamist.

Kaaluti 10 paukpadrunit ning iga paukpadruni puhul kaaluti ära kogu paukpadruni mass, välja raputatud püssirohu mass ning tühja kesta mass. Kaalumisel oli väga oluline kasutada kummikindaid, et paukpadruni kestale ei jääks näppudelt eralduvat higi ning rasva. Samuti ei tohi kaalumise ajal liigutada kaalu ning tuleb sulgeda kaalu kaitseümbrise kaas vältimaks

õhu liikumist mõõteplatvormi peal. Kaalumistulemused on näha tabelis 6. Parema ülevaate saamiseks lisati tabelisse veerg arvutatud püssirohu massiga.

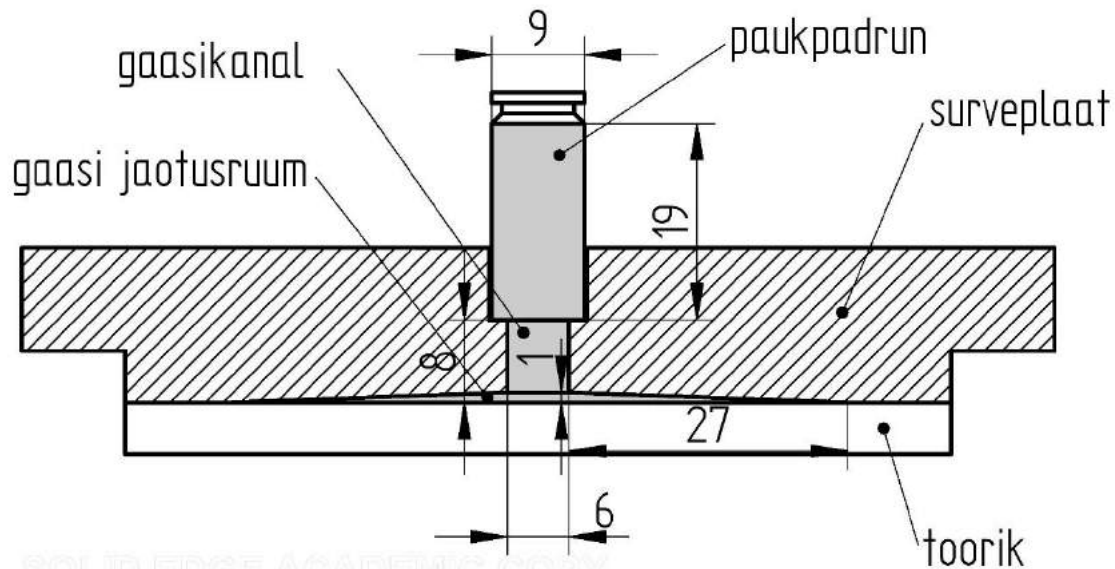
Tabel 6. Kaalumistulemused

Paukpadruni nr.	Mass, g			
	paukpadrun	kest	kaalutud püssirohi	arvutatud püssirohi
1	4,5402	4,3861	0,1540	0,1541
2	4,6014	4,4503	0,1508	0,1511
3	4,5785	4,4259	0,1525	0,1526
4	4,5786	4,4251	0,1531	0,1535
5	4,5997	4,4469	0,1531	0,1528
6	4,5303	4,3754	0,1547	0,1549
7	4,5582	4,4059	0,1527	0,1523
8	4,5691	4,4125	0,1565	0,1566
9	4,6266	4,4752	0,1509	0,1514
10	4,5504	4,3974	0,1531	0,153

Arvutuslik püssirohu mass saadi, kui kaalutud paukpadruni massist lahutati kaalutud tühja kesta mass. On näha, et need tulemused erinevad, seitsmel juhul on arvutuslik püssirohu mass suurem kaalutud püssirohu massist ning kolmel juhul väiksem. Arvutuslikud tulemused võivad olla suuremad sellepärast, et tühjadele kestadele võis külge jääda mingi osa mustusest. Plastist osa lahtilõikamisel oli tarvis kõvasti kestast kinni hoida ning seda väänata. Väiksemad tulemused võivad tuleneda asjaolust, et lõikamise käigus lõigati plastist mingi jupp välja. Arvutusliku püssirohu massi ei ole mõistlik kasutada, kuna lisaks mõõteveale sisaldub kogu veas ka arvutuslik viga. Edasiste arvutuste puhul kasutatakse ainult kaalutud püssirohu massi mõõteveaga $\pm 0,0001$ g.

3.3.2 Maksimaalse plahvatusjõu arvutamine

Tugevusarvutuste koha pealt on määravaks maksimaalne tekkiv rõhk. Valemi 3 põhjal sõltub rõhk püssirohu massist ning kinnise anuma ruumalast. Selleks, et leida maksimaalne rõhk on vaja leida minimaalne anuma ruumala. Selleks on surveplaadis olevast padrunipesast edasi minev gaasikanali, surveplaadi põhjas olev gaasi jaotusruumi ning paukpadruni enda ruumala. Antud ruumala on konstante. Joonis 10 selgitab surveplaadi ehitust.



Joonis 10. Surveplaadi ehitus, lõige läbi tsentri.

Joonisel 10 halliks värvitud ala ongi vähim tekkiv ruumala, kui matriitsile asetatakse toorik, mis ei deformeeru. Antud ruumala on arvutatav järgneva valemiga.

$$V_k = \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} \cdot h_p + \frac{\pi \cdot d_g^2}{4} \cdot h_g + \frac{\pi \cdot d_j^2}{4} \cdot \frac{h_j}{3} = \frac{\pi \cdot 0,9^2}{4} \cdot 1,9 + \frac{\pi \cdot 0,6^2}{4} \cdot 0,8 + \frac{\pi \cdot 5,4^2}{4} \cdot \frac{0,1}{3} = 2,1983 \text{ cm}^3 \quad (4)$$

kus V_k – minimaalne konstante anuma ruumala cm^3 ;

d_p – paukpadruni läbimõõt cm ;

h_p – paukpadruni püssirohu kambri kõrgus cm ;

d_g – gaasikanali läbimõõt cm ;

h_g – gaasikanali kõrgus cm ;

d_j – jaotusruumi (koonus) läbimõõt cm ;

h_j – jaotusruumi (koonus) kõrgus cm .

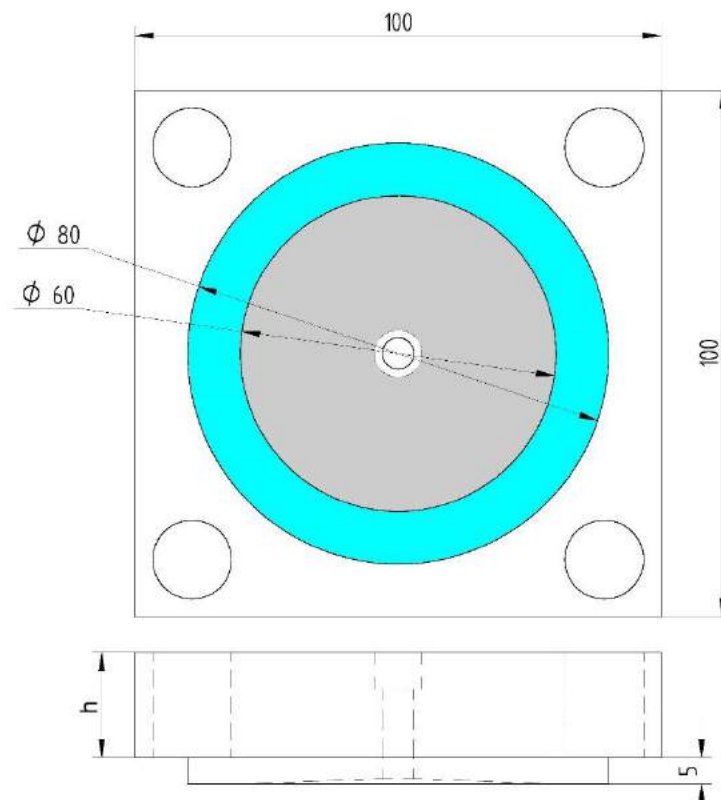
Maksimaalse rõhu arvutamisel huvitab meid olukord, kui initseeritakse paukpadrun, milles oli kõige rohkem püssirohtu. Kaalumistulemustest (tabel 6) on näha, et kõige suurema kogusega paukpadrun oli nr. 8, kus oli 0,1565 g püssirohtu. Kuna kehtib ka mõõteviga $\pm 0,0001 \text{ g}$ saan maksimaalseks püssirohu massiks $m_{pmax} = 0,1565 + 0,0001 = 0,1566 \text{ g}$. Maksimaalne rõhk püssirohu põlemisel on leitav kasutades valemit 3.

$$P_{max} = 1765,8 \cdot \left(\frac{m_{pmax}}{V_k} \right)^{1,23} = 1765,8 \cdot \left(\frac{0,1566}{2,1983} \right)^{1,23} = 68,5123 \text{ MPa}$$

Kõik edasised konstruktsiooni tugevusarvutused teostatakse tuginedes saadud maksimaalsele rõhule.

3.4 Surveplaadi paksuse arvutamine

Vormimisel on kindlaks tehtud, et soovitakse vormida detaile, mille läbimõõt on 80 mm. Samuti on soov, et seade oleks ülevalt vaates ruudu kujuline külje pikkused 100 mm. Surveplaadi mõõtmeid on näha joonisel 11.



Joonis 11. Surveplaadi mõõdud altvaates.

Joonisel 11 siniseks värvitud ala surutakse vastu toorikut. Halli ala sees toimub tooriku vormimine rõhu abil. Hallis alas mõjub surveplaadile ühtlane põikkoormus. Antud juhul tuleb leida joonisel 11 kujutatud tundmatu suurus h , mis on plaadi vähim paksus. Silindiline väljaaste kõrgusega 5 mm on selle jaoks, et surveplaadi ja matriitsi hoidiku vahelt ei saaks miskit välja lennata. Plaadi paksuse saab arvutada, lahendades neljal nurgal postidele toetuva

plaadi ülesanne, mille lahenduse jaoks vajalikud andmed on toodud ehituskonstruktori käsiraamatus [8]. Ehituskonstruktori käsiraamatus toodud ülesande algtingimused on, et plaat toetub neljal nurgal postidele ning kogu plaadi ulatuses mõjub ühtlane põikkoormus [8]. Põhiline erinevus autori ülesandega on see, et autori ülesande puhul mõjub põikkoormus plaadi keskel 60 mm-se diameetriga ringi sees. Kõigepealt leitakse maksimaalne paindemoment .

$$M_{max} = M_{b0} \cdot 10^{-4} \cdot p \cdot l^2, \quad (4)$$

kus M_{max} – maksimaalne paindemoment N·mm;
 M_{b0} – paindemomendi koefitsient serva keskel;
 p – ühtlane põikkoormus N·mm⁻¹;
 l – plaadi lühema külje pikkus mm.

Eeltoodud valemis on tarvis kasutada ühtlast põikkoormust, mis näitab kui palju jõudu mõjub pikkusühiku kohta. Leitud maksimaalne rõhk näitab jõu mõju pindalaühiku kohta, et teisendada see põikkoormuseks, tuleb see läbi korrutada joonisel 11 toodud halli pinna pindalaga ning jagada plaadi küljepikkusega. Selle tehtega leitakse põikjõu väärtus, mis seejärel jaotatakse kogu plaadi laiusele. Ühtlaseks põikkoormuseks saadakse $p = 68,5123 \cdot (\pi \cdot 60^2/4)/100 = 1937,1396 \text{ N/mm}$. Maksimaalne paindemoment valemi 4 järgi on.

$$M_{max} = 1604 \cdot 10^{-4} \cdot 1937,1396 \cdot 100^2 = 3107171,9910 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Vastavalt tugevustingimusele paindel on suurimad paindepinged ristküliklõikega profiili puhul arvutatavad valemiga 5 [9].

$$\max \sigma = \frac{M_{max} \cdot 6}{b \cdot h^2} \quad (5)$$

kus $\max \sigma$ – suurim paindepinge MPa;
 M_{max} – maksimaalne paindemoment N·mm;
 b – ristlõike laius mm;
 h – ristlõike kõrgus mm.

Surveplaadi valmistamisel kasutatakse enamlevinud konstruktisooniterast markeeringuga S235, mille voolavuspiir on $235 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$. Asendades valemis 5 suurima paindepinge materjali S235 voolavuspiiriga ning avaldades h , saan leida surveplaadi paksuse.

$$h = \sqrt{\frac{M_{\max} \cdot 6}{b \cdot \max \sigma}} = \sqrt{\frac{3107171,9910 \cdot 6}{100 \cdot 235}} = 28,17 \text{ mm}$$

Paksus h on surveplaadi kõige õhema ristlõike kõrgus, sellele tuleb juurde liita veel astme kõrgus, mis on 5 mm, sellisel juhul saab surveplaadi paksuseks minimaalselt 33,17 mm.

3.5 Matriitsi hoidiku põhja ning seina paksuse arvutamine

Matriitsi hoidiku põhjale mõjuvad samuti põikjõud. Matriits asetseb matriitsi hoidikus vabalt ning vormimise käigus surutakse matriits vastu matriitsi hoidiku põhja. Põhi peab olema piisava paksusega vältimaks mitteelastseid deformatsioone. Matriitsi hoidiku põhi on ringikujuline läbimõõduga 60 mm. Ehituskonstruktori käsiraamatus pole lahendust ümmargusele plaadile. Lihtsuse mõttes võrdsustame hetkel ümmarguse põhja ruudulisega, võttes ruudu küljepikkuseks põhja diameetri 60 mm. Järgmisena tuleb lahendada neljast servast jäigalt kinnitatud plaadi ülesanne. Kuna plaadi mõõdud muutusid, tuleb arvutada uuesti ühtlane põikkoormus, milleks saame $p = 68,5123 \cdot (\pi \cdot 60^2/4)/60 = 3228,5661 \text{ N/mm}$. Suurim paindemoment tekib plaadi serva keskel ning on leitav valemiga 4.

$$M_{\max} = 511 \cdot 10^{-4} \cdot 3228,5661 \cdot 60^2 = 593927,0198 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Kasutades valemit 5 leitakse matriitsi hoidiku põhja paksus s .

$$s = \sqrt{\frac{M_{\max} \cdot 6}{b \cdot \max \sigma}} = \sqrt{\frac{593927,0198 \cdot 6}{60 \cdot 235}} = 15,90 \text{ mm}$$

Matriitsi hoidiku seina silinderpinnas tekivad rõhu kasvamisega ringpinged. Vajaliku seinapaksuse saab arvutada valemiga 6 [9].

$$t = \frac{P_{\max} \cdot D}{4 \cdot \sigma} \cdot \sqrt{3} = \frac{68,5123 \cdot 80}{4 \cdot 235} \cdot \sqrt{3} = 10,10 \text{ mm} \quad (6)$$

- kus t – seinapaksus mm;
 P_{max} – maksimaalne rõhk MPa;
 D – seina siseläbimõõt mm;
 σ – materjali voolepiir MPa.

Saadud seinapaksus peab olema matriitsi hoidiku kõige õhemas kohas, milleks on joonisel 8 näha olev astme ning serva vaheline kaugus.

3.6 Matriitsi materjal

Punktis 3.2 valiti matriitsi valmistamise materjaliks puit. Mõistlik on kasutada kõvapuitu, milleks on kas saar või tamm. Kõvapuidu kasutamine pikendab mõnevõrra matriitsi eluiga, kuna kõvem pind kannatab rohkem survet ning ei kulu nii kiiresti kui pehme puit. Antud töös valitakse matriitsi materjaliks saare puit. Saare puit on tugevam ning kõvem kui tammepuit, vastavad tugevusnäitajad on 65 MPa ja 52 MPa Janka kõvaduse järgi (määratakse 11,3 mm läbimõõduga teraskuuli surumisega puidu otspinna sisse kuuli poole läbimõõduni) [10]. Matriitsi sees olev vormi kuju määratakse punktis 3.7.

3.7 Poldide läbimõõdu arvutamine

Surveplaat kinnitatakse matriitsihoidiku külge nelja poldiga. Antud olukorras töötavad poldid tõmbele. Et leida ühe poldi läbimõõt on tarvis teada kui suur tõmbejõud mõjub ühele poldile. Kogu tõmbejõud on leitav, kui korrutada maksimaalne püssirohu põlemisel tekkiv rõhk joonisel 11 toodud halli ala pindalaga. Tõmbejõuks saadakse $N_k = 68,5123 \cdot \pi \cdot 60^2 / 4 = 193713,9645 \text{ N}$. Ühele poldile mõjub neli korda väiksem jõud $N_p = N_k / 4 = 193713,9645 / 4 = 48428,4911 \text{ N}$. Kasutatakse selliseid polte, mille omadusklass on 10.9 voolepiiriga $900 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$. Poldide diameeter on arvutatav järgneva valemiga [9].

$$D_p = \sqrt{\frac{N_p \cdot 4}{R_m \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{48428,4911 \cdot 4}{900 \cdot \pi}} = 8,28 \text{ mm} \quad (7)$$

- kus D_p – poldi läbimõõt mm;
 N_p – maksimaalne rõhk MPa;

R_m – poldi materjali voolepiir $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$.

Poltide läbimõõduks valitakse 10 mm.

3.8 Arvutused vormitava lehtmetalli kohta

Lehtmetalli arvutustes tuleb arvestades asjaoluga, et paukpadrunites olev püssirohu mass kõigub. Selleks, et tooriku saavutaks nõutud kuju tuleb lehtmetalli arvutused sooritada vähima püssirohu massiga. Tabeli 6 põhjal on püssirohu vähimaks massiks kaalutud 0,1508 g ning arvestades kaalu mõõteviga saadakse vähim püssirohu mass $m_{pmin} = 0,1508 - 0,0001 = 0,1507 \text{ g}$.

Antud töö käigus on vormitavaks lehtmetalliks valitud 0,5 mm paksune vaseplekk margitähisega Cu-FRTP ning tunnusnumbriga CW006A. Antud materjali mehaanilised omadused on välja toodud tabelis 7.

Tabel 7. Vasepleki Cu-FRTP mehaanilised omadused [10]

Margitähis	Kõvadus, HB	Tõmbetugevus, $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	Voolepiir, $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	Katkevenivus, %
Cu-FRTP	40-65	200	140	33

Antud materjal sai valitud, kuna tal on kõrge katkevenivus ning tõmbetugevus on suhteliselt madal. Materjali vormimiseks vajalik surve sõltub vormi kujus olevast vähimast raadiusest [11]. Teoreetiliselt on peaaegu võimatu saada plahvatuslehtvormimisega teravat nurka. Vajalik surve tooriku deformeerimiseks on arvutatav järgneva valemiga [11].

$$P_{def} = \frac{2 \cdot R_m \cdot s}{R} \cdot K_v \quad (8)$$

kus P_{def} – materjali deformeerimiseks vajalik surve MPa;

R_m – tooriku voolepiir $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$;

s – tooriku paksus mm;

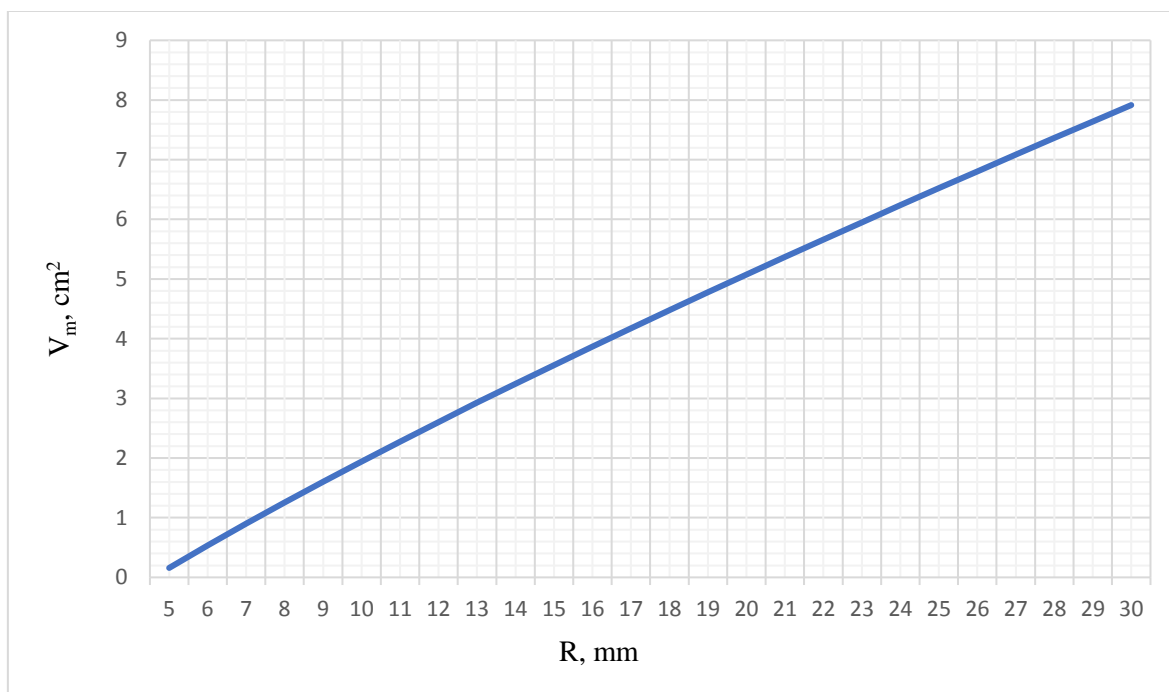
R – vormi vähim raadius mm;

K_v – koefitsent, püssirohu puhul 1,5.

Valemi 3 järgi sõltub surve anuma ruumalast, mis koosneb konstantsest ruumalast (paukpadruni, gaasikanali ning gaaside jaotusruum) ning matriitsi sees oleva kuju ruumalast. Selleks, et toorik saavutaks nõutud kuju peab kehtima tasakaal valemite 3 ja 8 vahel ehk vormi vähim raadius ning vormi ruumala peavad olema õigesti valitud. Parim viis on lahendada antud ülesanne graafiliselt, kus funktsiooni muutujaks on vormi vähim raadius ning tulemuseks matriitsi vormi ruumala. Antud funktsiooni leidmiseks tuleb võrdsustada valemid 5 ja 11 ning avaldada matriitsi kuju ruumala. Valem saavutab kuju.

$$V_m = f(R) = \frac{m_{pmin}}{\left(\frac{2 \cdot R_m \cdot s}{1765,8 \cdot R} \cdot K_v\right)^{\frac{1}{1,23}}} - V_k$$

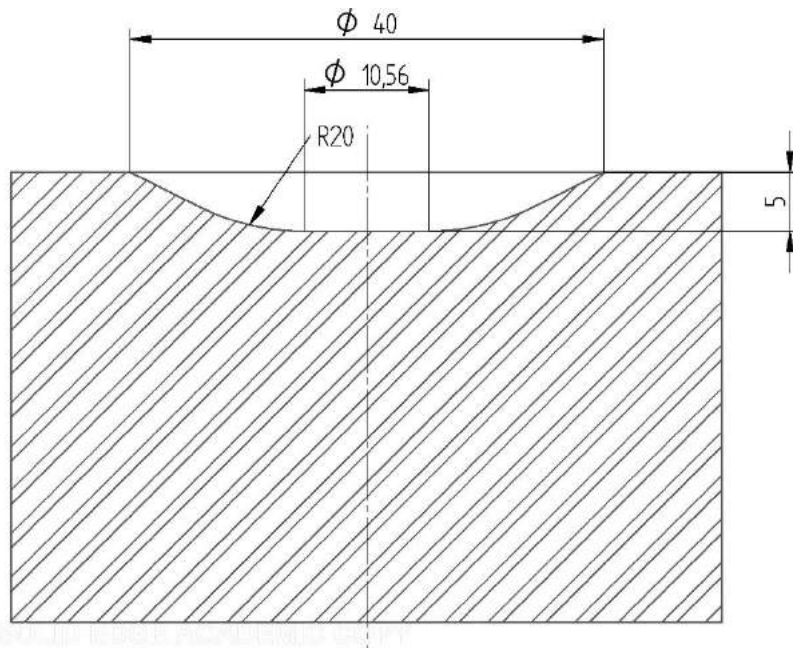
Arvutused teostati MS Excelis ning tulemused on näha joonisel 12.



Joonis 12. Matriitsi kuju ruumala sõltuvus matriitsi kuju vähimast raadiusest.

Arvutustulemustest selgus, et alla 5 mm raadiusega ei ole võimalik lehtvormimist teostada, sest püssirohu põlemisel ei teki piisavat survet.

Järgnevalt tuleb välja mõelda detaili kuju mida hakatakse vormima. Vormi kujuks valiti äralõigatud tipuga ning ümardatud servaga koonus. Vormi mõõtmed on kujutatud matriitsi ristlõikes joonisel 13.



Joonis 13. Matriitsi ristlõige vormi kuju mõõtmetega.

Vormi kuju ruumalaks Solid Edge keskkonnas mõõdeti 3,56 cm³. Vähim kasutatav raadius on 20 mm. Joonisel 12 on näha, et vormi kuju vähima raadiuse 20 mm juures võib maksimaalne vormi kuju ruumala olla ≈ 5 cm³. Seega antud vormi mõõtmed on sobilikud.

3.9 Päästemehhanism

Paukpadruni intisteerimiseks on tarvis lööki vastu kapslit. Antud juhul teostatakse löök pendelvasara abil. Pendelvasara varre külge on kinnitatud tõmbevedru. Pendelvasara keeramisega ülemisse asendisse vedru pikeneb ning tõmbab pendelvasarat vastupidises suunas. Vedru pikenemisel tekivad vedrus pinged, mis väljenduvad potentsiaalse energiana [12].

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2 \quad (9)$$

kus E_p – vedru potentsiaalne energia J;

k – vedru jäikus N·m⁻¹;

x – vedru pikenemine m.

Löögi tugevus peab olema 0,43 J [13]. Mehaanikainseneri käsiraamatust valitakse mittelegeervedruterastaadist (DIN EN 10270-1) sobiva pikkusega tõmbevedru. Tõmbevedru andmed on välja toodud tabelis 8.

Tabel 8. Tõmbevedru andmed

Tunnus	Väärtus
Traadi läbimõõt, mm	1,1
Vedru läbimõõt, mm	12
Paigaldushülsi vähim läbimõõt, mm	14
Koormamata vedru pikkus, mm	27,8
Koormamata vedru tööpikkus, mm	11,83
Vedru eelpingestusjõud, N	2,99
Vedru suurim lubatav koormus, N	41,95
Vedru jäikus, N·mm ⁻¹	1,181
Suurimale koormusele vastav deformatsioon, mm	32,98

Järgnevalt tuleb leida vedru pikenemine, et saavutataks vedru potentsiaalne energia 0,43 J. Selleks tuleb avaldada valemist 9 vedru pikenemine x .

$$x = \sqrt{\frac{2 \cdot E_p}{k}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,43}{1181}} = 0,02699 \text{ m}$$

Tulemuseks saadi, et vedru peab soovitud potentsiaalse energia saamiseks pikenema 26,99 mm, mis on antud vedru maksimaalsest lubatavast deformatsioonist 32,98 mm väiksem. Vedru tuleb pendelhaamri vardale kinnitada selliselt, et vedru pikenemine oleks minimaalselt 27 mm.

3.10 Polükarbonaadist kaitsekast

Täiendava ohutusmeetmena paigutatakse plahvatuslehtvormimise seade polükarbonaadist seintega kasti sisse. Juhul, kui konstruktsioon ei pea survele vastu, võtab polükarbonaat vastu võimalike lendkehade löögienergia ning takistab ümbritsevat keskkonda ja inimesi viga saamise eest.

Polükarbonaat on ilmastikukindel, väga kõrge löögikindlusega, hea valguse läbilaskvusega ning kergesti töödeldav (lõikamiseks ja puurimiseks sobivad tavalised käsitööriistad) läbipaistev materjal [14]. Antud materjaliga tehtud katsetused kinnitavad, et 3 mm paksune polükarbonaadist leht talub kokkupõrget kehaga, mis kaalub 104 grammi ning liigub kiirusega $79,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [15]. Antud töös valitakse materjaliks Proplastik OÜ poolt pakutavat Makrolon Mono (polükarbonaat) paksusega 3 mm [14].

Kasti põhi valmistatakse 40 mm paksusest vineerist. Külgseinad ning lagi valmistatakse polükarbonaadist ning kinnitatakse üksteise külge jäigalt. Lisatugevuse saamiseks kasutatakse 3 kihti polükarbonaati. Saadud põhjata karp kinnitatakse vineerist plaadi külge hingede abil. Selliselt ei jää avatuna karbi küljed plahvatuslehtvormimise seadmega töötamisel ette.

KOKKUVÕTE

Antud bakalaureusetöö eesmärgi saavutamiseks püstitatud ülesanded said kõik lahendatud. Seade ei valminud täielikult kirjaliku osaga samaaegselt, seega puudub kirjalikust osast katselise osa kirjeldus.

Kirjanduse uurimise käigus leiti, et plahvatuslehtvormimine arenes väga kiiresti 1950. aastatel lennuki- ning raketitööstuses. Plahvatuslehtvormimist kasutati ning kasutatakse ka tänapäeval järgmiste eeliste tõttu: vormitava detaili suuruse ning paksuse piirangute puudumine ning selliste sulamite lehtvormimine, mis pressidel oleks problemaatiline. Lõhkeainetest kasutatakse nii tugevaid kui ka nõrkasid lõhkeaineid ning mis valitakse vastavalt kasutatavale süsteemi tüübile. Püssirohu põlemise uurimise käigus leiti, et püssirohu põlemisel kinnises anumask tekib rõhu tõus, mis sõltub püssirohu massist ning anuma ruumalast.

Projekteerimist alustati lõhkeaine valikuga. Valiku tegemisel tugineti Eesti Vabariigis kehtivatele seadustele. Seaduste uurimise käigus leiti, et ainukeseks sobivaks lõhkeaineaks sobib püssirohi ning mida kasutatakse paukpadrunite näol. Paukpadrunite kasutamise piiravaks teguriks on kasutaja vanus, mis ei tohi olla alla 18 aasta. Järgnevalt kaaluti paukpadrunites olev püssirohu mass, millest kõige suuremat tulemust kasutati konstruktsiooni tugevusarvutustes ning vähimat vormitava lehtmaterjaliga seonduvate arvutuste tegemisel.

Paukpadruni initseermiseks pakuti päästemehhanismi mis põhineb pendelvasaral. Pendelvasara varre külge kinnitatakse tõmbevedru, mis tagab vasara nõutava löögienergia. Arvutustulemustest selgus, et 1,1 mm läbimõõduga mittelegeervedruterastraadist vedru korral peab nõutava löögienergia saavutamiseks vedru pikenema 26,99 mm.

Täiendava ohutusmeetmena pakuti välja kasutada polükarbonaadist kaitsekasti. Materjali paksuse hindamisel lähtuti sama materjaliga tehtud purunemiskatsest. Kast konstrueeriti selliselt, et ei avane mitte ainult kasti lagi vaid ka külgsseinad.

Lõputöö peamine eesmärk täidetud – suudeti projekteerida seadustele vastav plahvatuslehtvormimise seade.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Kulu, P., Kübarsepp, J., Laansoo, A., Pirso, J., Valdma, L.** (2001) Metallööpetus ja metallide tehnoloogia II: Metallide tehnoloogia 1. Tallinn: TTÜ kirjastus. 188 lk.
2. Metalworking World Magazine – A short sheet metal history. [on – line] <http://www.metalworkingworldmagazine.com/a-short-sheet-metal-history/> (03.04.2018)
3. **Pearson, J., Rinehart, J.S.** (1963) Explosive forming of metals. New York: A Pergamon Press Book. 391 lk.
4. Lõhkematerjaliseadus. (vastu võetud 24.03.2004, viimati jõustunud 01.05.2004). – *Riigi Teataja* <https://www.riigiteataja.ee/akt/735272> (25.04.2018)
5. Lõhkematerjali valmistamise, hoidmise ja kasutamise ohutuseeskiri. (vastu võetud 30.11.1999, viimati jõustunud 01.06.2002). – *Riigi Teataja* <https://www.riigiteataja.ee/akt/26116> (25.04.2018)
6. Relvaseadus. (vastu võetud 13.06.2001, viimati jõustunud 19.03.2018). – *Riigi Teataja* <https://www.riigiteataja.ee/akt/13166920> (25.04.2018)
7. Jahipaun OÜ – Tarvikud. [on – line] <https://www.jahipaun.ee/netipood/toode/stardipustolid-ja-revolvrid/stardikate-tarvikud/umarex/paukpadrunid-perfecta-titan-9mm-p-a-k--4152/> (26.04.2018)
8. **Masso, T.** (2014) Ehituskonstruktori käsiraamat. Tallinn: Ehitame kirjastus. 577 lk.
9. **Klauson, A.** (2012) Tugevusõpetus. Tallinn: TTÜ kirjastus. 639 lk.
10. **Kulu, P.** (2015) Mehaanikainseneri käsiraamat. Tallinn: TTÜ kirjastus. 492 lk.
11. **Kruusamägi, A.** (1970) Survega töötlemine II. Tallinn: TPI rotaprint. 128 lk.
12. **Tipler, P.A., Walker, J.S.** (1995) Physics for Scientists and Engineers. New York: Worth Publishers. 345 lk.
13. The Well Guided Bullet – Firing pin impact studies. [on – line] <http://www.thewellguidedbullet.com/pdfs/FiringPinImpactStudies.pdf> (15.05.2018)
14. Proplastik OÜ – Massiivplastik PC. [on – line] <http://proplastik.ee/ehitusplast/massiivplastik-pc-polukarbonaat/> (20.05.2018)
15. **Gunnarsson, A.C., Ziemski, B., Weerasooriya, T., Moy, P.** (2009) Deformation and Failure of Polycarbonate during Impact as a Function of Thickness. – *Proceedings of the SEM Annual Conference*. Albuquerque, USA.

SUMMARY

The established tasks, to achieve the objectives of this bachelor thesis, were all solved. The construction of the device was not finished simultaneously with the written part of the thesis.

During research of the literature it was found, that explosive forming was developing rapidly in aircraft and rocket industry in the 1950-s. Explosive forming was used and is used nowadays for the next advantages: the lack of limitations for details dimensions and material thickness and the possibility to form alloys which on presses would be problematic. Powerful and weak explosives are used which are determined by the system used. During research of black powder burning it was found, that the value of the pressure in closed system is determined by the mass of the black powder and volume of the closed system.

The construction started with explosive determination. The selection was made by learning the laws of the Republic of Estonia. It was found, that the only legal explosive was black powder in form of blank cartridges. The only restriction using blank cartridges is the user's age, which can not be under 18 years. Following the mass of black powder in the blank cartridges was measured. The highest value was used in strength calculations and lowest in forming sheet metal calculations.

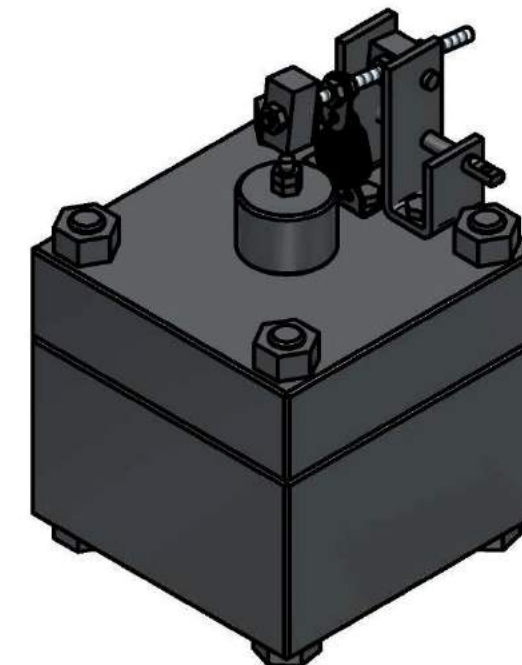
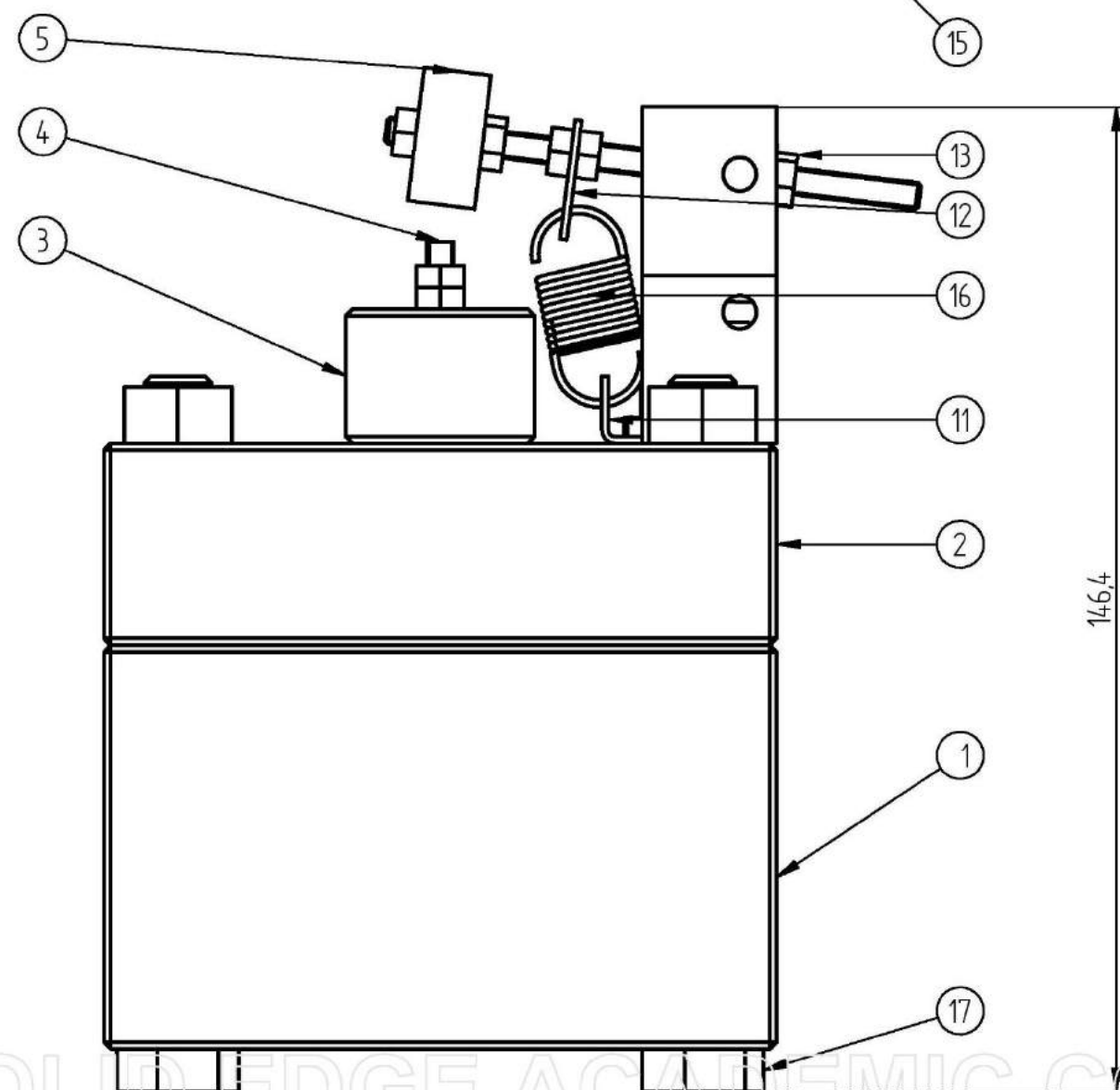
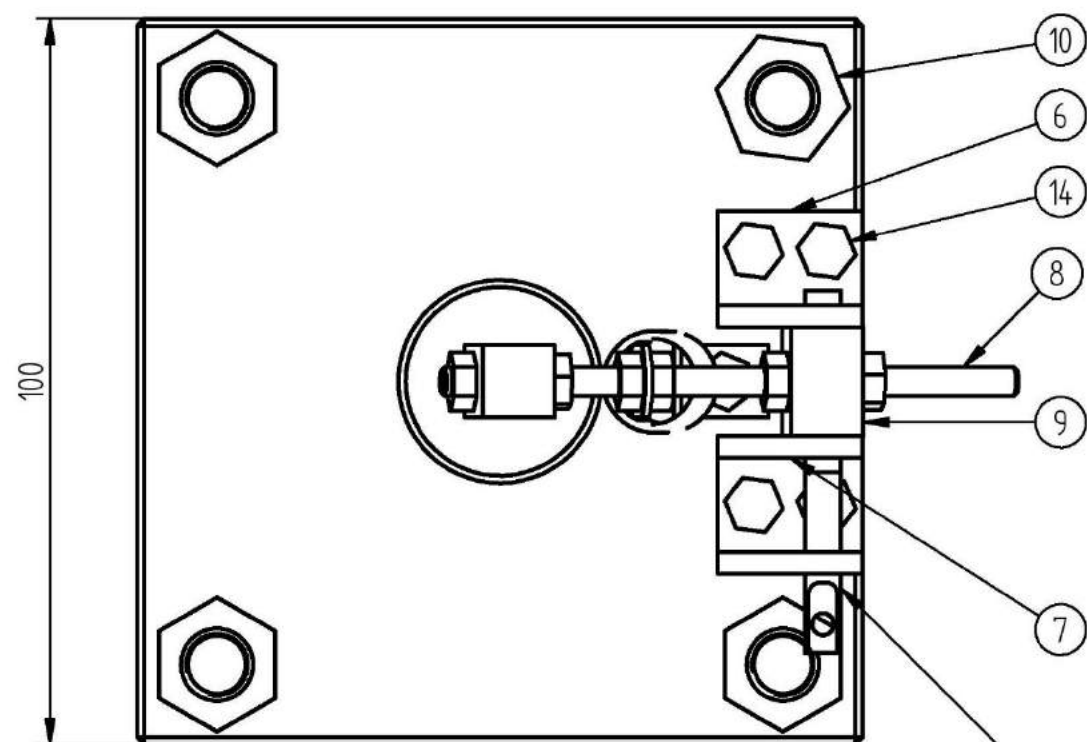
To initiate blank cartridge pendulum hammer as cocking mechanism was introduced. A tension spring was attached on the pendulum pole to provide required impact energy. Calculations showed, that 26,99 mm of spring travel is needed, when using 1.1 mm mechanic spring steel wire.

For extra precaution a use of polycarbonate box was implemented. The thickness of the material was valued by the tests, that were made with the same material. The box was constructed in the way, that walls were moving with the top and bottom stay in the place.

The objective of this bachelor thesis was achieved – a legal explosive forming device was constructed.

LISAD

Lisa A

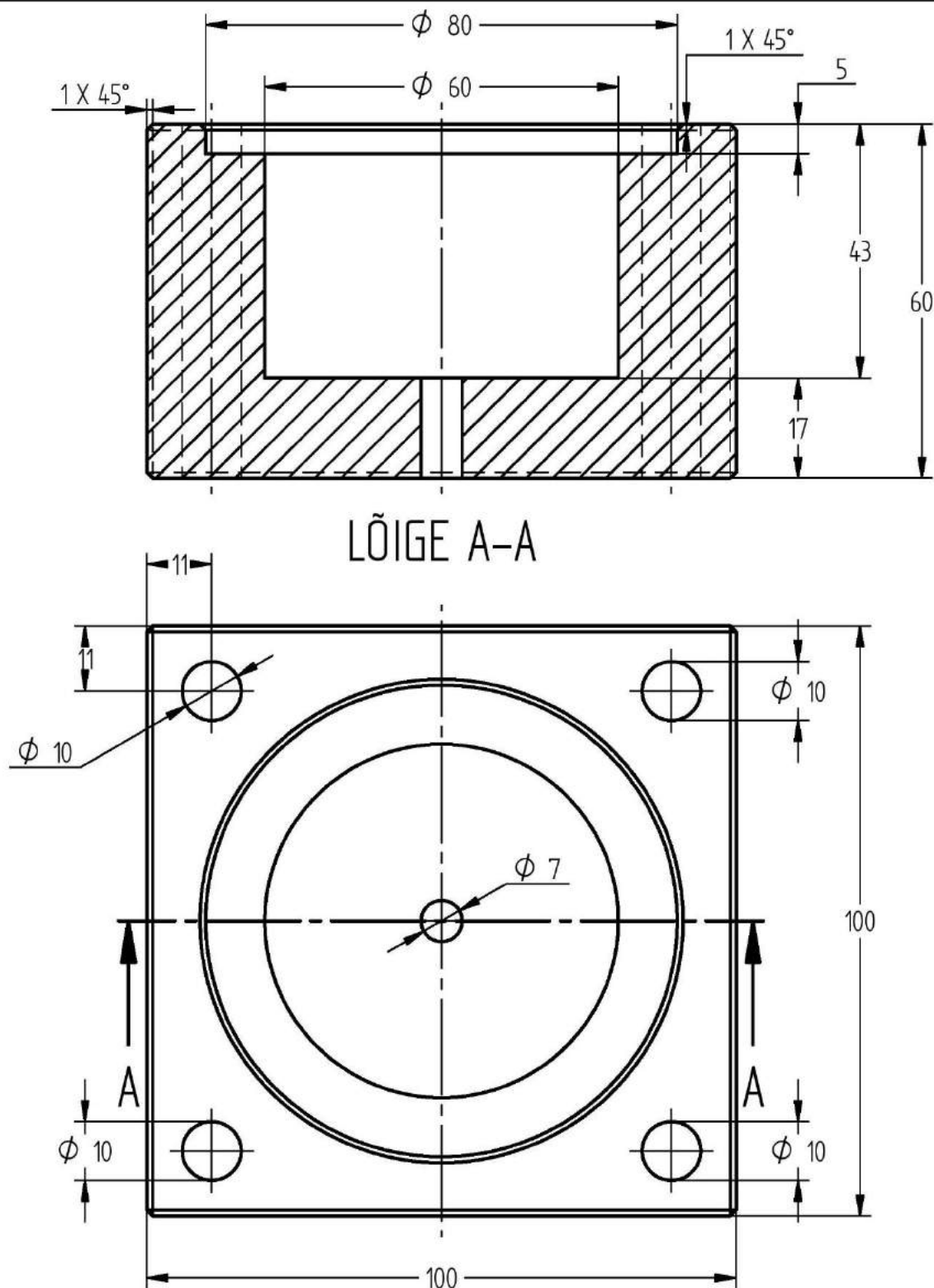


1		Matriitsi hoidik, S235JR	TA 18/140581 A 01 01 □	1	
2		Surveplaat, S235JR	TA 18/140581 A 01 02 □	1	
3		Padunipesa kork, S235JR	TA 18/140581 A 01 03 □	1	
4		Lööknöel (8.8 M4 – tsingitud)	TA 18/140581 A 01 12 □	1	
5		Pendelvasara pea, S235JR	TA 18/140581 A 01 06 □	1	
6		Pendelvasara kinnitus, S235JR	TA 18/140581 A 01 04 □	1	
7		Pendelvasara, splindi kinnitus, S235JR	TA 18/140581 A 01 05 □	1	
8		Pendelvasara varras (8.8 M4–tsingitud)	TA 18/140581 A 01 08 □	1	
9		Pöördliigend, S235JR	TA 18/140581 A 01 07 □	1	
10		Mutter (M10x1,5 – tsingitud)		4	
11		Vedru kinnitus 1, S235JR	TA 18/140581 A 01 09 □	1	
12		Vedru kinnitus 2, S235JR	TA 18/140581 A 01 10 □	1	
13		Mutter (M4 – tsingitud)		8	
14		Polt (8.8 M4 – tsingitud)		5	
15		Splint, S235JR	TA 18/140581 A 01 11 □	1	
16		Tõmbevedru, vedruterastaat		1	
17		Polt (10.9 M10x1,5 – tsingitud)		4	
Osa	Väli	Nimetus, materjal	Tähis	Hulk	Märkus

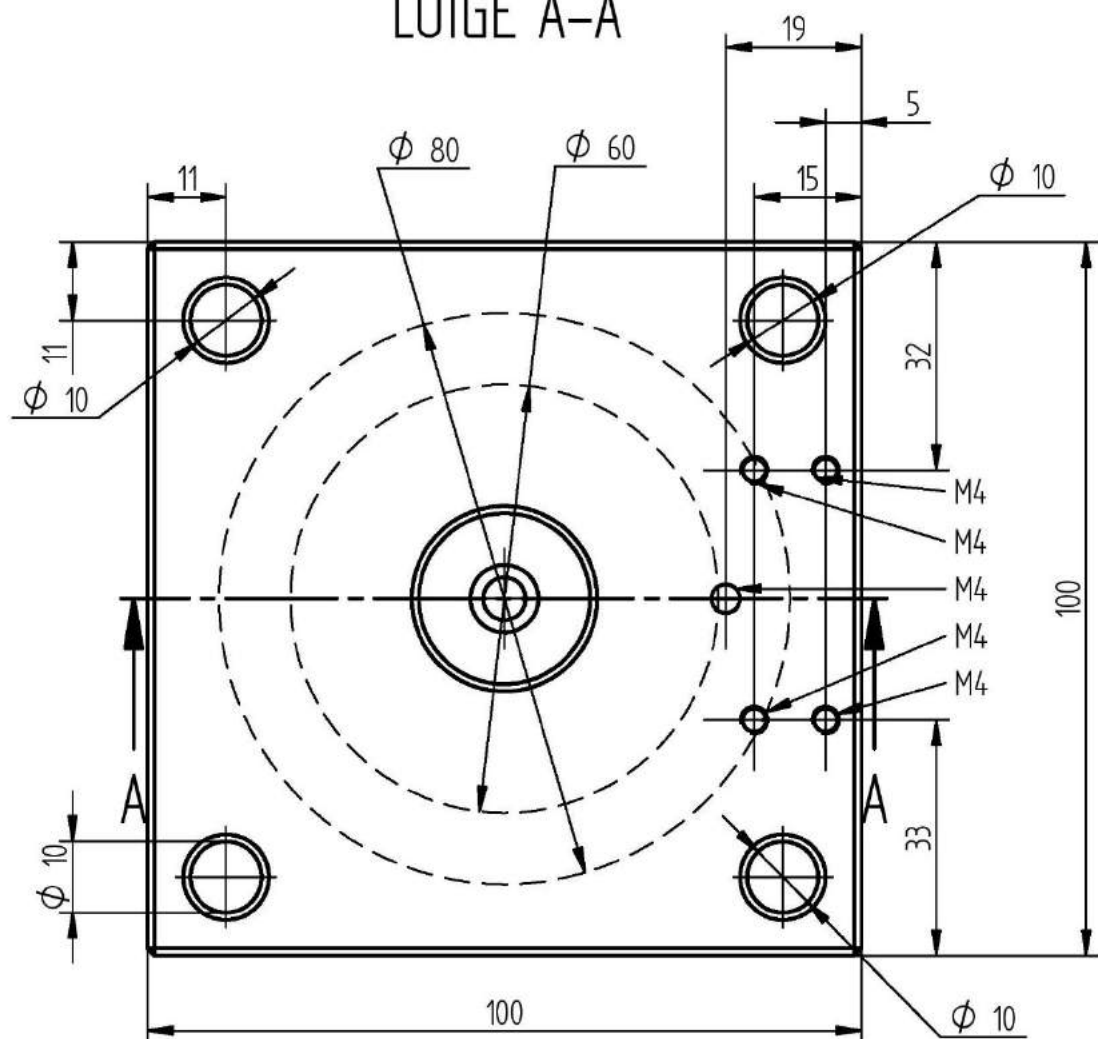
	Materjal:	Näitamata piirhälbed:	Mass:	Mõõt:
		ISO 2768 – m	6,5 kg	1:1

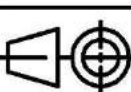

Teostas	Anti Samsonov	Nimetus:	Plahvatuslehtvormimise seadme koost
Kontrollis	Heiki Lill		
Kinnitas	Heiki Lill		

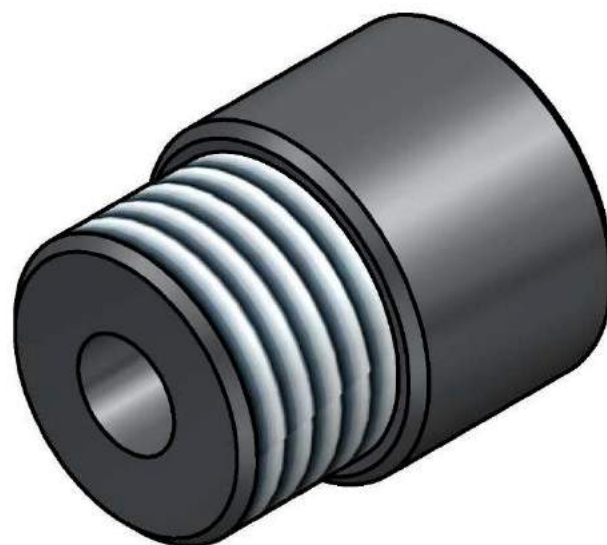
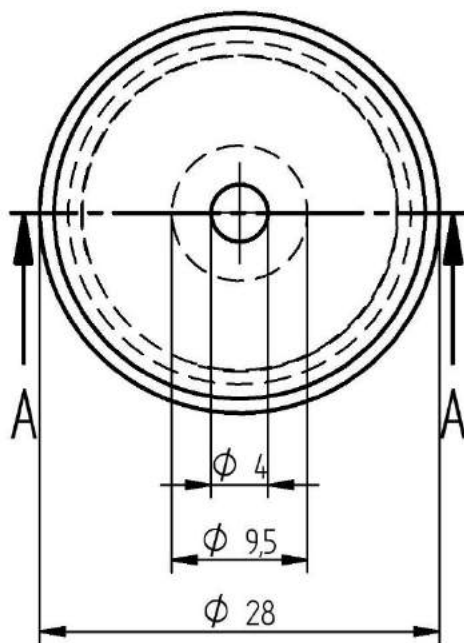
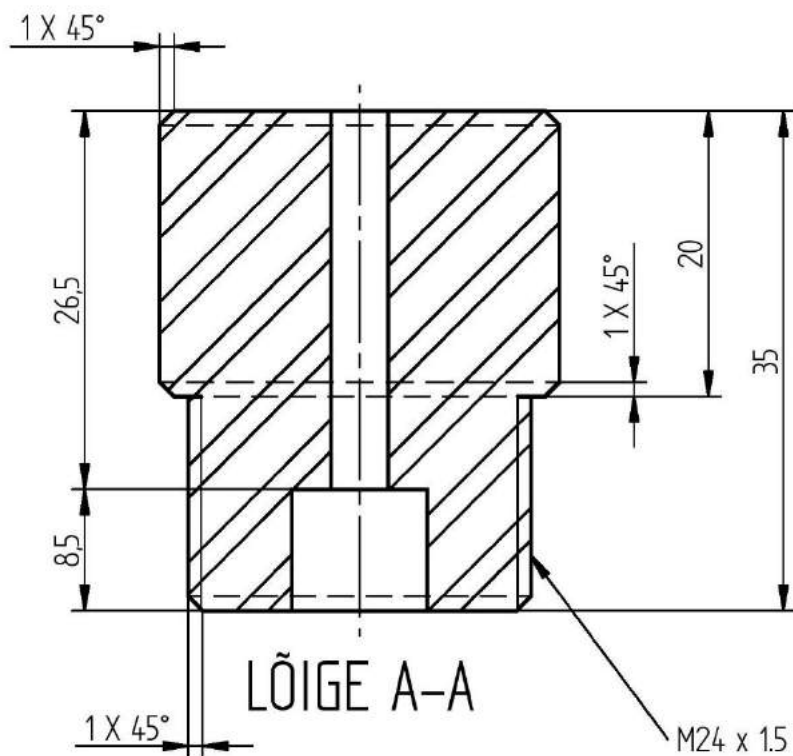
	Leht:	Tähis:
1/1	TA 18/140581 A 01 00 K	



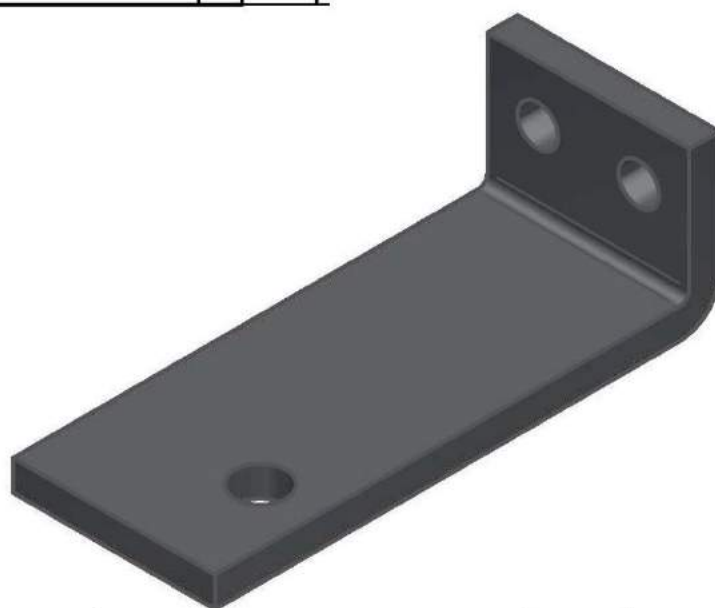
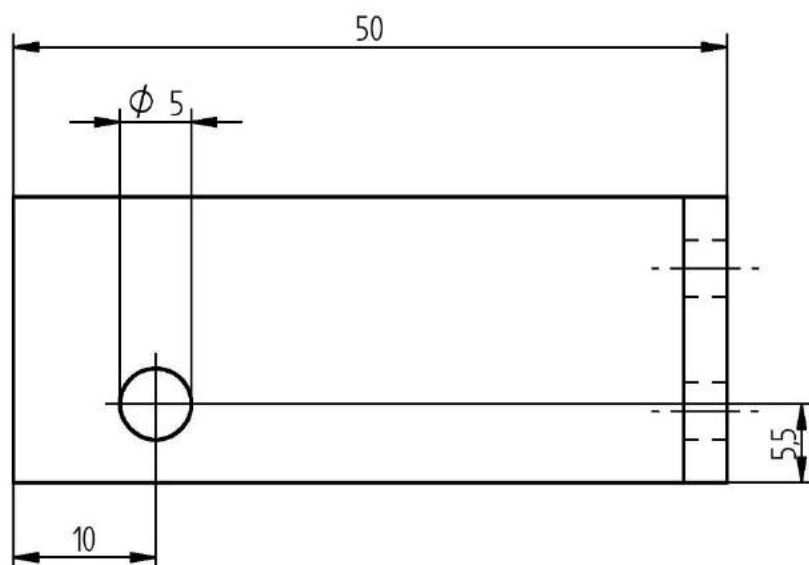
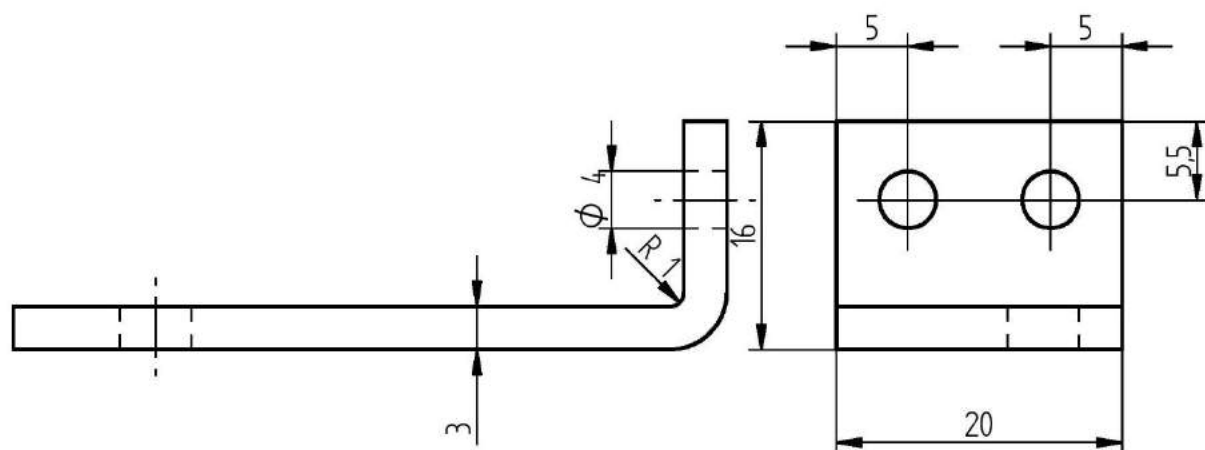
	Materjal: S235JR	Naitamata piirhalbed: ISO 2768 – m	Mass: 3,5 kg	Mõõt: 1:1
Teostas	Anti Samsonov	Nimetus: Matriitsi hoidik		
Kontrollis	Heiki Lill			
Kinnitas	Heiki Lill			
Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Tehnikainspektor Institute of Technology		Leht: 1/1	Tähis: TA 18/140851 A 01 01 D	



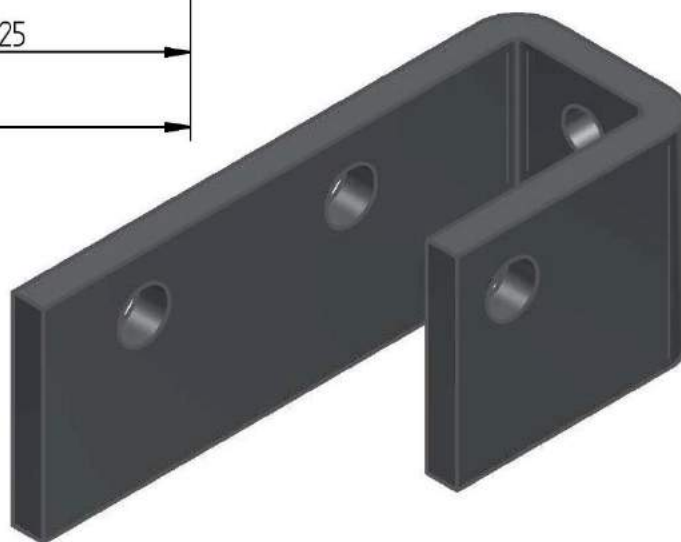
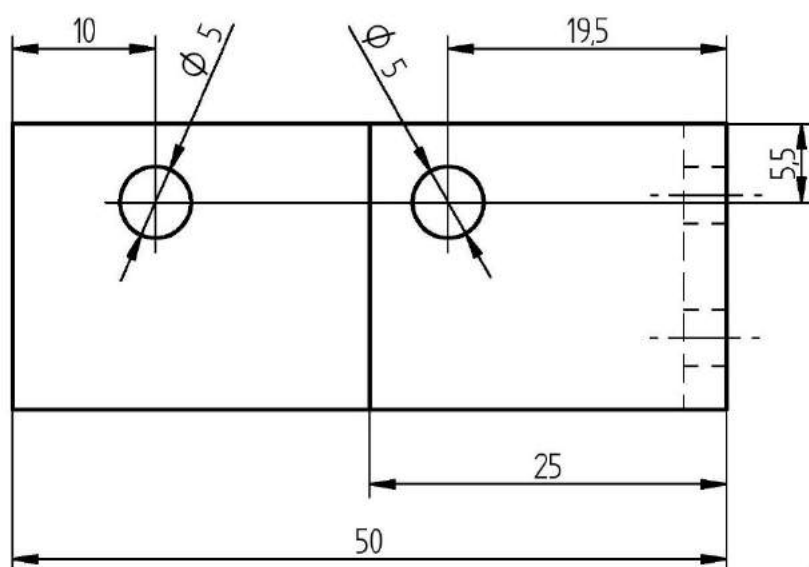
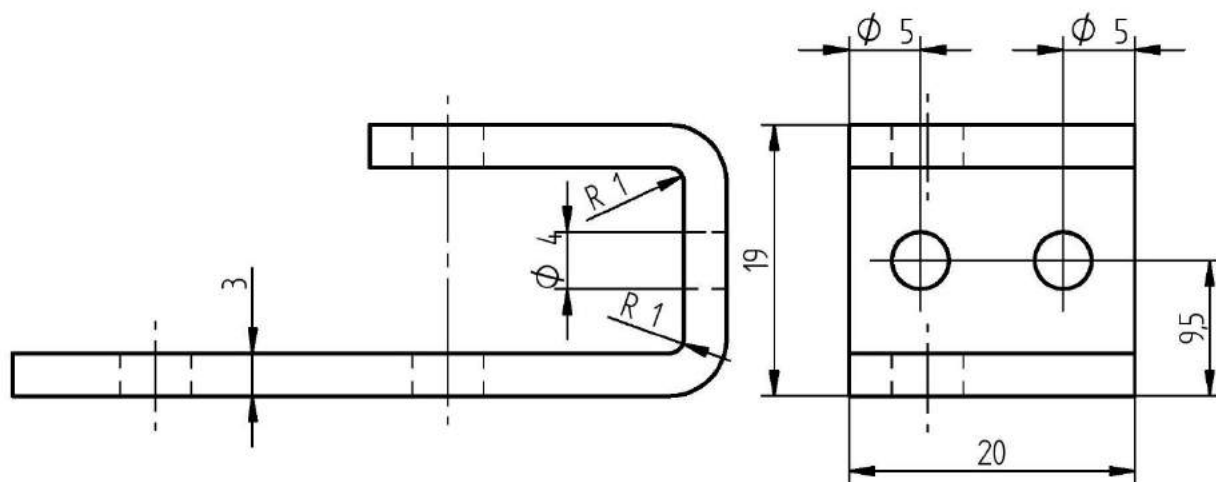
	Materjal: S235JR		Naitamata piirhälbed: ISO 2768 – m	Mass: 2,4 kg	Mõõt: 1:1
	Teostas	Anti Samsonov	Nimetus: Surveplaat		
	Kontrollis	Heiki Lill			
	Kinnitas	Heiki Lill			
 Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Tehnikainskiit Institute of Technology		Leht: 1/1	Tähis: TA 18/140581 A 01 02 D		



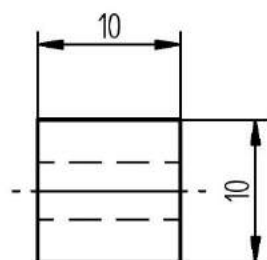
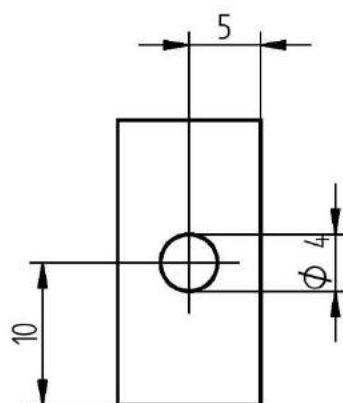
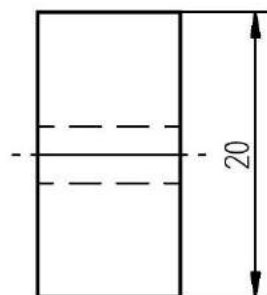
	Materjal: S235JR	Näitamata piirhälbed: ISO 2768 – m	Mass: 0,14 kg	Mõõt: 2:1
Teostas	Anti Samsonov	Nimetus: Padrunipesa kork		
Kontrollis	Heiki Lill			
Kinnitas	Heiki Lill			
		Leht: 1/1	Tähis: TA 18/140581 A 01 03 D	



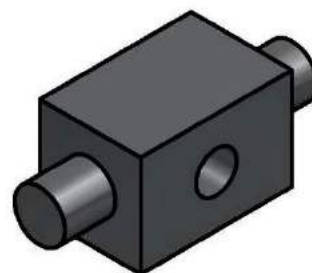
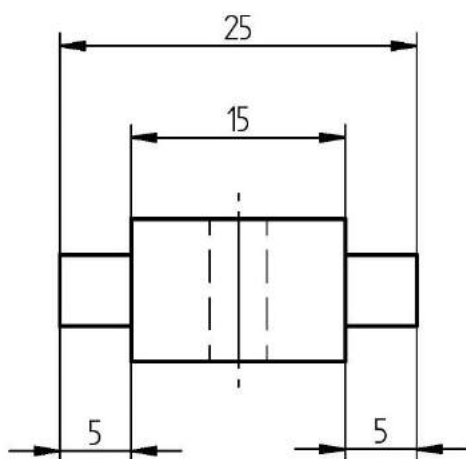
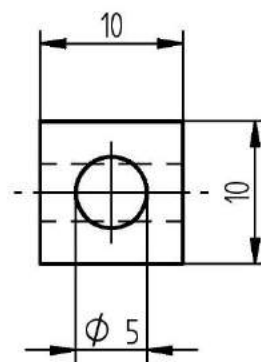
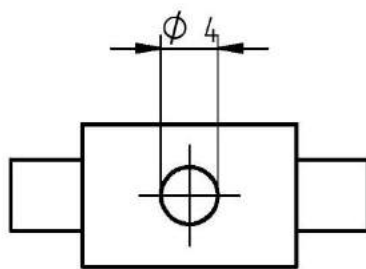
	Materjal: S235JR	Näitamata piirhälbed: ISO 2768 – m	Mass: 0,03 kg	Mõõt: 2:1
Teostas	Anti Samsonov	Nimetus: Pendelvasara kinnitus		
Kontrollis	Heiki Lill			
Kinnitas	Heiki Lill			
Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Tehnikainsituum Institute of Technology		Leht: 1/1	Tähis: TA 18/140581 A 01 04 D	



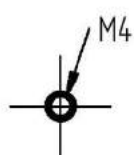
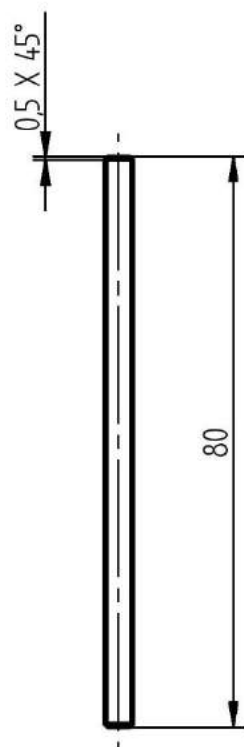
	Materjal: S235JR	Näitamata piirhälbed: ISO 2768 – m	Mass: 0,04 kg	Mõõt: 2:1
Teostas	Anti Samsonov	Nimetus: Pendelvasara ja splindi kinnitus		
Kontrollis	Heiki Lill			
Kinnitas	Heiki Lill			
		Leht: 1/1	Tähis: TA 18/140581 A 01 05 D	




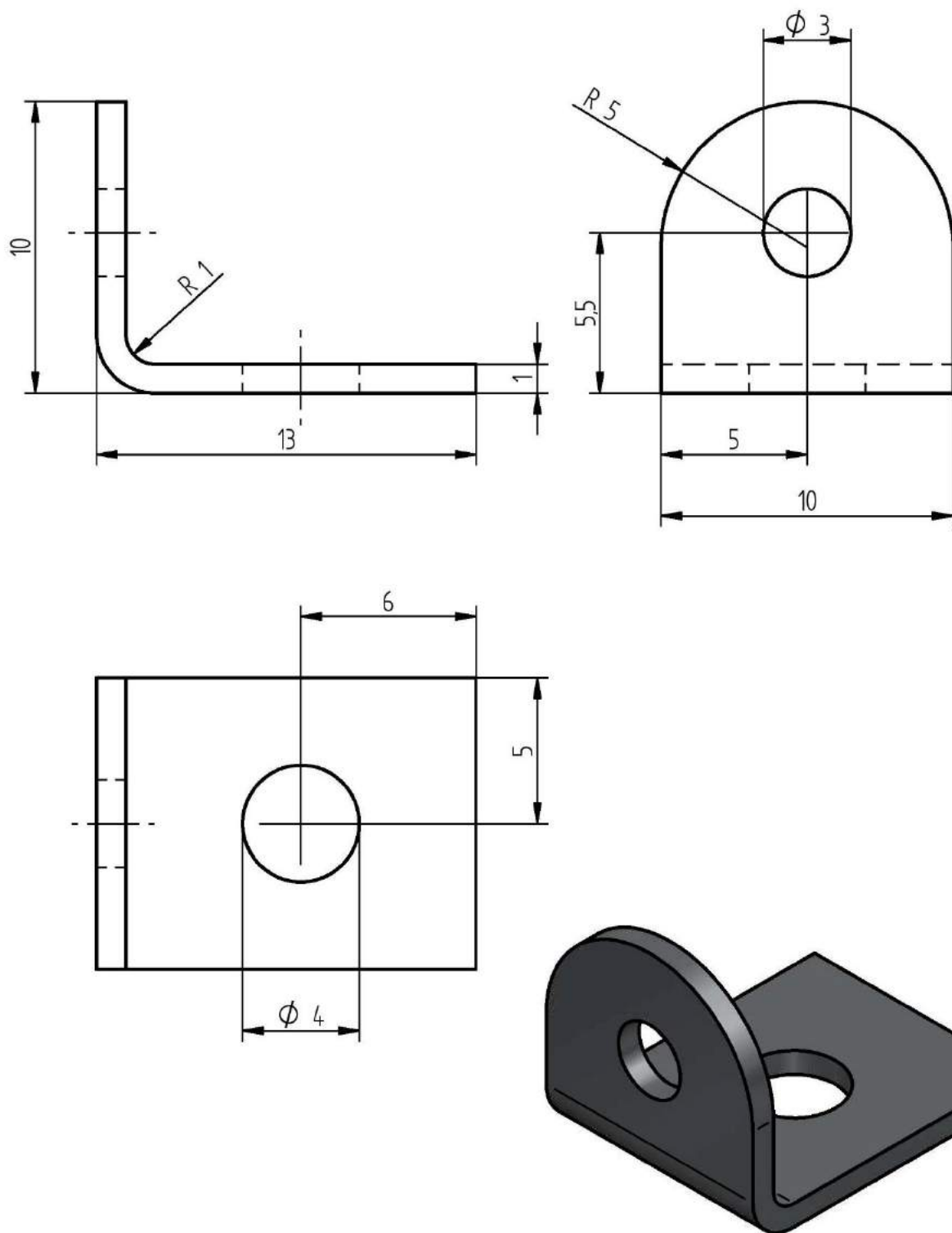
	Materjal: S235JR	Näitamata piirhälbed: ISO 2768 – m	Mass: 0,02 kg	Mõõt: 2:1
Teostas	Anti Samsonov	Nimetus: Pendelvasara pea		
Kontrollis	Heiki Lill			
Kinnitas	Heiki Lill			
Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Tehnikainskiit Institute of Technology		Leht: 1/1	Tähis: TA 18/140581 A 01 06 D	




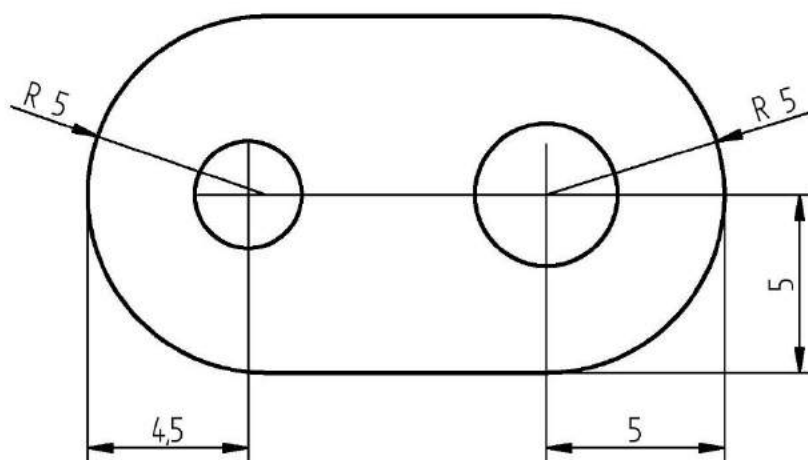
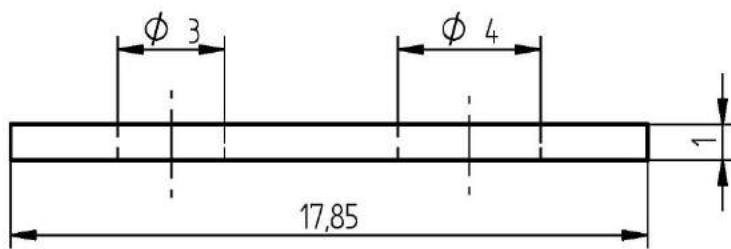
	Materjal: S235JR	Näitamata piirhälbed: ISO 2768 – m	Mass: 0,01 kg	Mööd: 2:1
Teostas	Anti Samsonov	Nimetus: Pöördliigend		
Kontrollis	Heiki Lill			
Kinnitas	Heiki Lill			
		Leht: 1/1	Tähis: TA 18/140581 A 01 07 D	



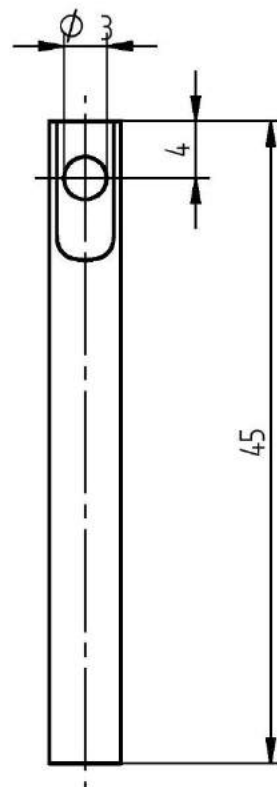
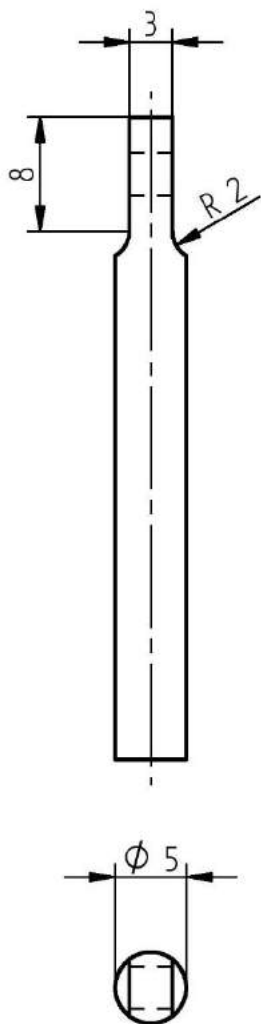
	Materjal: Teras 8.8	Näitamata piirhälbed: ISO 2768 – m	Mass: 8 g	Mõõt: 1:1
Teostas	Anti Samsonov	Nimetus: Pendelvasara varras		
Kontrollis	Heiki Lill			
Kinnitas	Heiki Lill			
 Eesti Maaülikool <small>Estonian University of Life Sciences</small> <small>Tehnikainskiit</small> <small>Institute of Technology</small>		Leht: 1/1	Tähis: TA 18/140581 A 01 08 D	



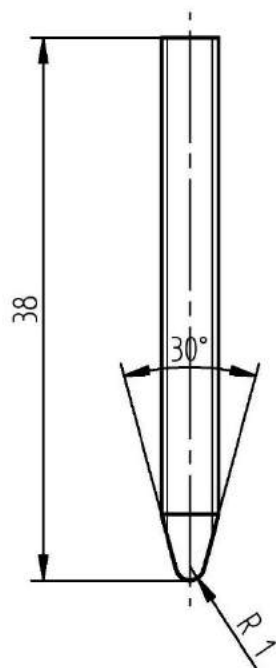
	Materjal: S235JR	Näitamata piirhälbed: ISO 2768 – m	Mass: 1 g	Mõõt: 5:1
Teostas	Anti Samsonov	Nimetus: Vedru kinnitus 1		
Kontrollis	Heiki Lill			
Kinnitas	Heiki Lill			
 Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Tehnikainsituum Institute of Technology		Leht: 1/1	Tähis: TA 18/140581 A 01 09 D	




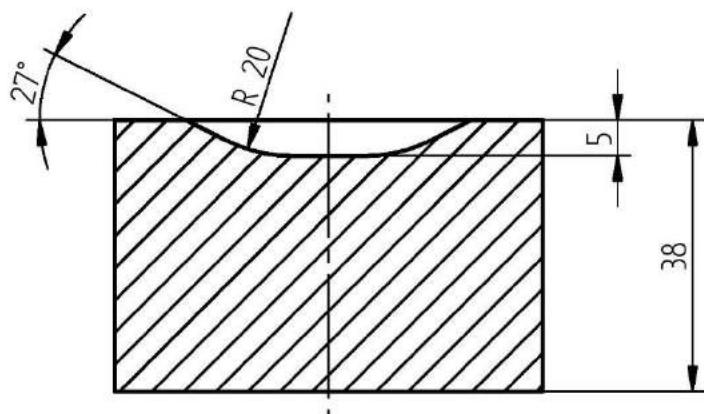
	Materjal: S235JR	Näitamata piirhälbed: ISO 2768 – m	Mass: 1 g	Mõõt: 5:1
Teostas	Anti Samsonov	Nimetus: Vedru kinnitus 2		
Kontrollis	Heiki Lill			
Kinnitas	Heiki Lill			
Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Tehnikainskiituse Institute of Technology		Leht: 1/1	Tähis: TA 18/140581 A 01 10 D	



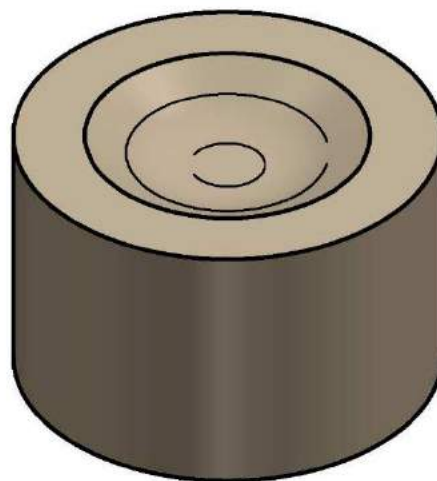
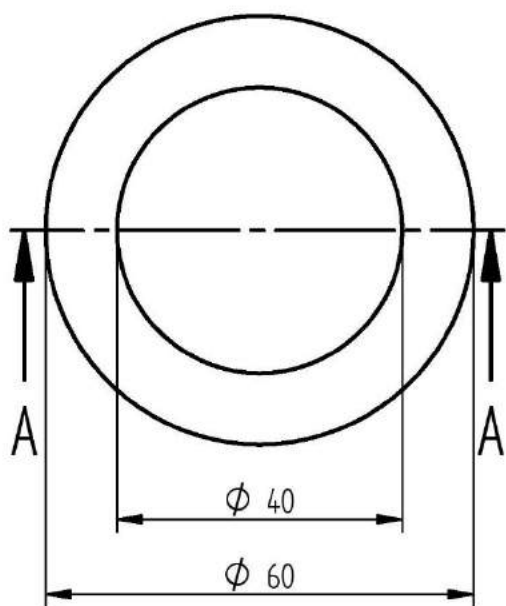
	Materjal: S235JR	Näitamata piirhälbed: ISO 2768 – m	Mass: 6 g	Mõõt: 2:1
Teostas	Anti Samsonov	Nimetus: Splint		
Kontrollis	Heiki Lill			
Kinnitas	Heiki Lill			
Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Tehnikainskiituse Institute of Technology		Leht: 1/1	Tähis: TA 18/140581 A 01 11 D	



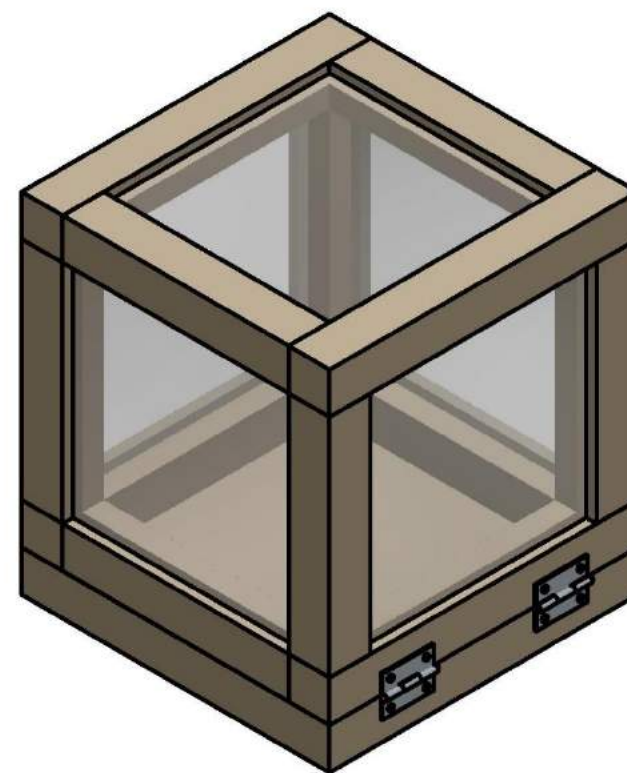
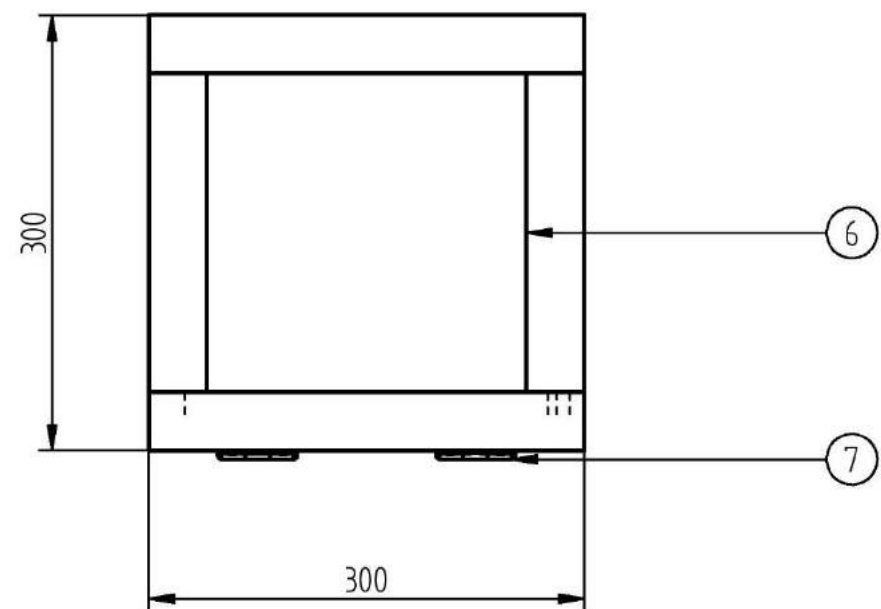
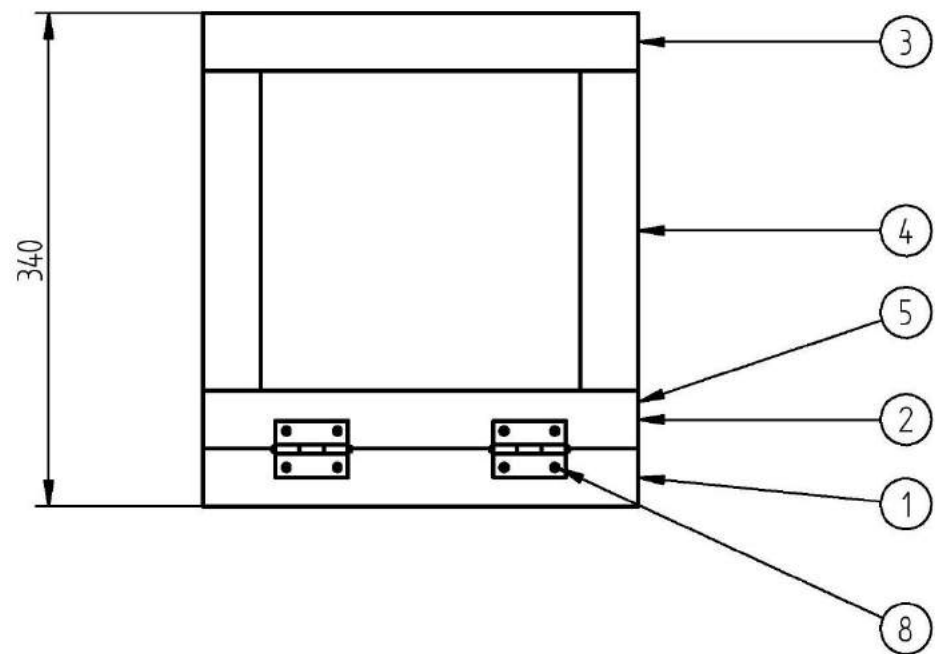
	Materjal: Teras 8.8	Naitamata piirhälbed: ISO 2768 – m	Mass: 4 g	Mõõt: 2:1
Teostas	Anti Samsonov	Nimetus: Lööknõel		
Kontrollis	Heiki Lill			
Kinnitas	Heiki Lill			
 Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Tehnikainskiit Institute of Technology		Leht: 1/1	Tähis: TA 18/140581 A 01 12 D	



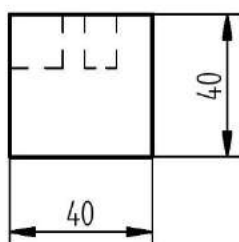
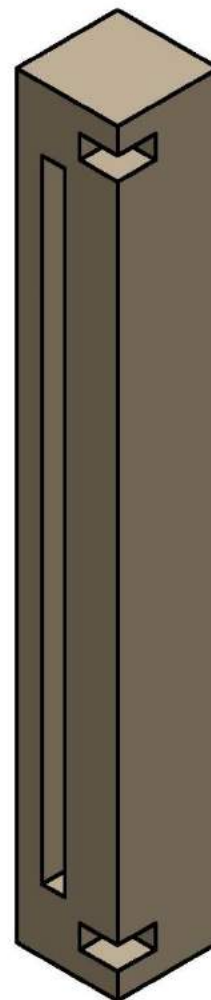
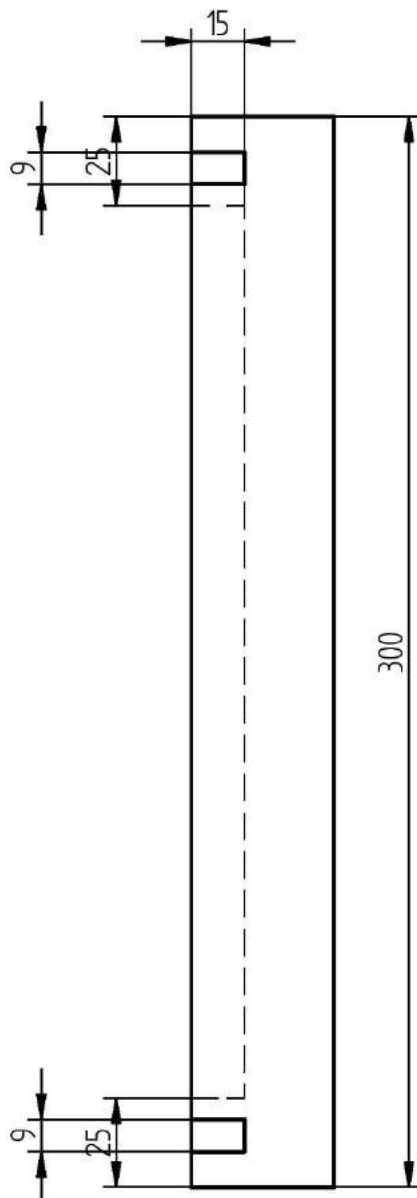
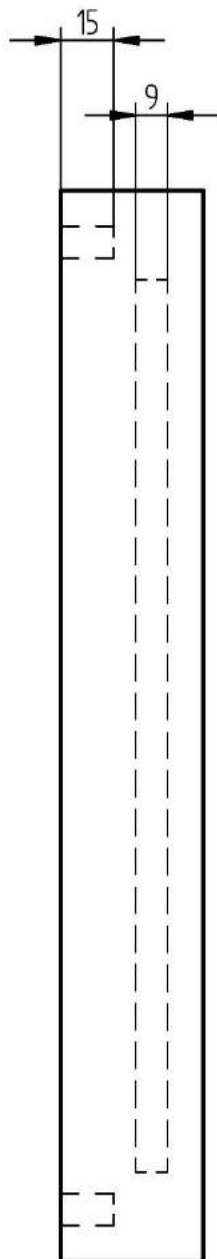
LÕIGE A-A



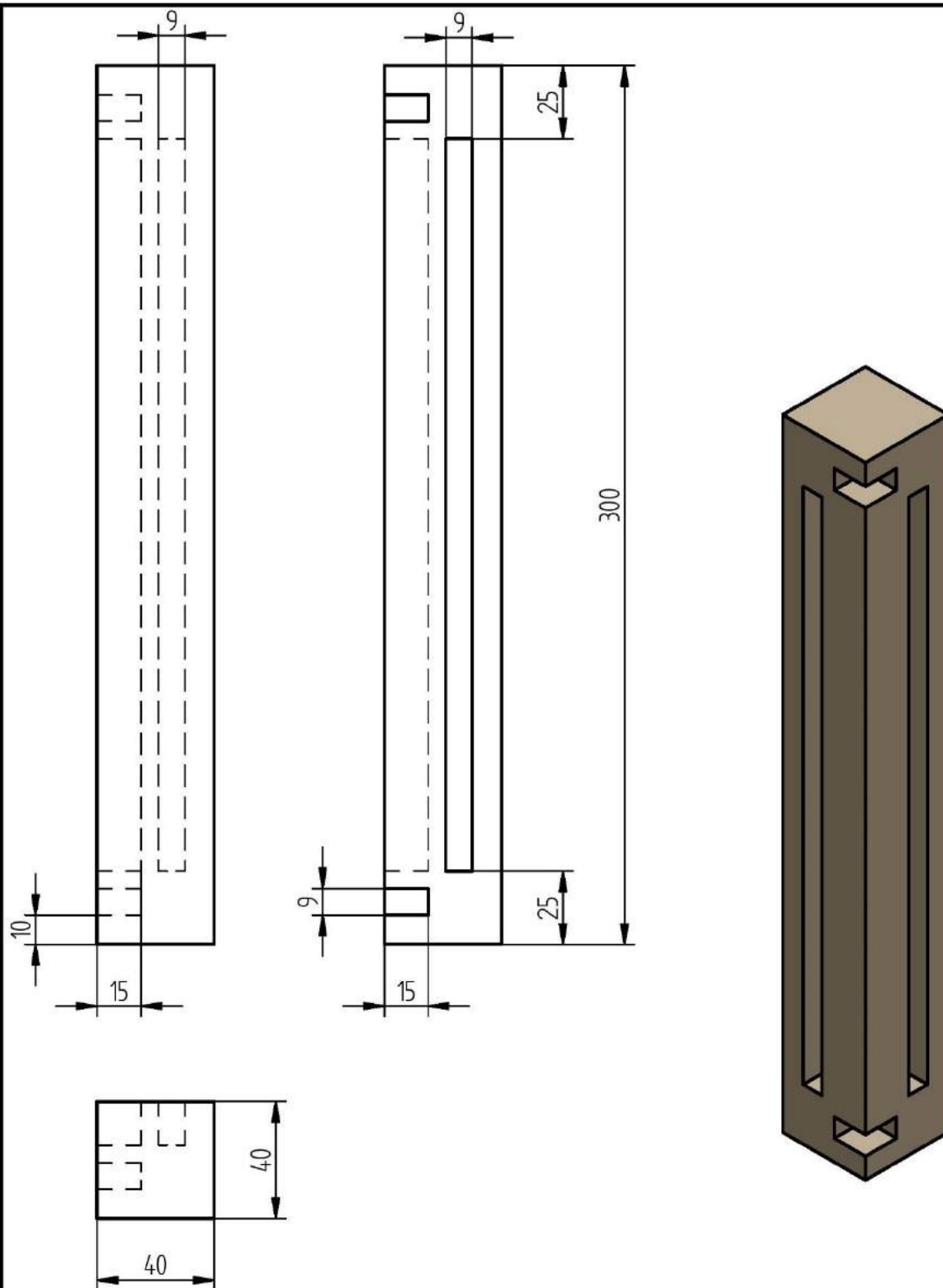
	Materjal: Saar	Naitamata piirhalbed: ISO 2768 – m	Mass: 0,07 kg	Mõõt: 1:1
Teostas	Anti Samsonov	Nimetus: Matriits		
Kontrollis	Heiki Lill			
Kinnitas	Heiki Lill			
	Leht: 1/1	Tähis: TA 18/140581 A 01 13 D		



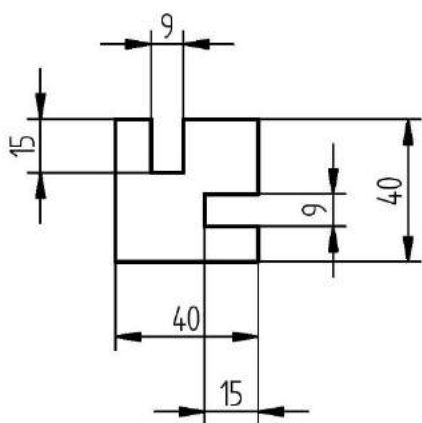
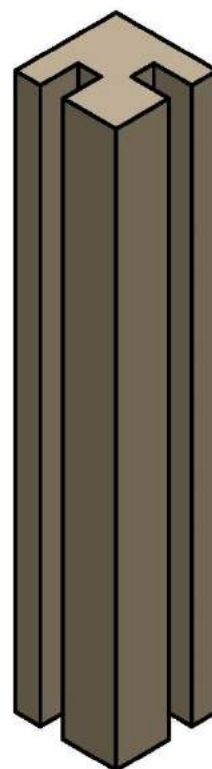
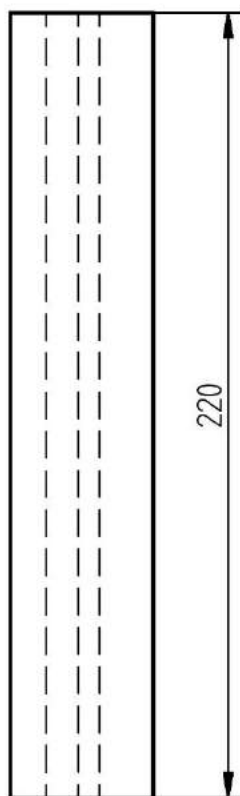
1		Põhi, vineer	TA 18/140581 A 02 05 D	1	
2		Nelikantpruss A, mänd	TA 18/140581 A 02 01 D	2	
3		Nelikantpruss B, mänd	TA 18/140581 A 02 02 D	2	
4		Nelikantpruss C, mänd	TA 18/140581 A 02 03 D	6	
5		Nelikantpruss D, mänd	TA 18/140581 A 02 04 D	2	
6		Leht, polükarbonaat	TA 18/140581 A 02 06 D	15	
7		Hinged, teras		2	
8		Puidukruvi		4	
Osa	Väli	Nimetus, materjal	Tähis	Hulk	Märkus
		Materjal:	Näitamata piirhälbed: ISO 2768 - m	Mass: 12 kg	Mööd: 15
Teostas	Anti Samsonov	Kaitsekasti koost			
Kontrollis	Heiki Lill				
Kinnitas	Heiki Lill				
		Leht:	1/1	Tähis:	TA 18/140581 A 02 00 K




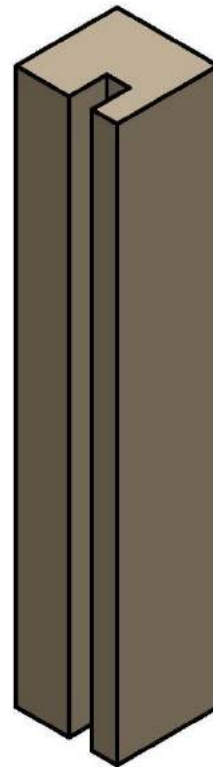
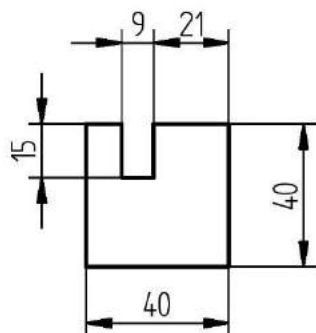
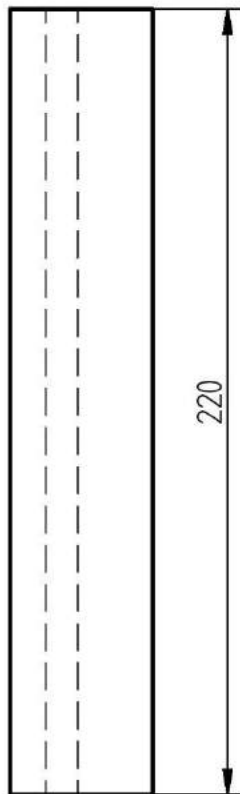
	Materjal: Mänd	Näitamata piirhalbed: ISO 2768 – m	Mass: 0,25 kg	Mööd: 1:2
Teostas	Anti Samsonov	Nimetus: Nelikantpruss A		
Kontrollis	Heiki Lill			
Kinnitas	Heiki Lill			
		Leht: 1/1	Tähis: TA 18/140581 A 02 01 D	



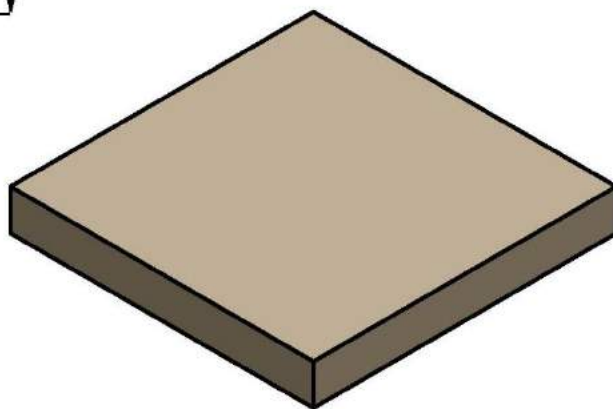
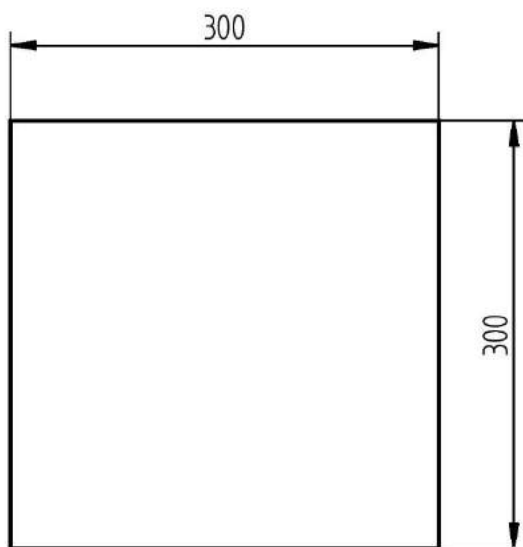
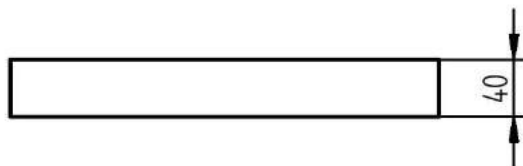
	Materjal: Mänd	Näitamata piirhälbed: ISO 2768 – m	Mass: 0,23 kg	Mõõt: 1:2
Teostas	Anti Samsonov	Nimetus: Nelikantruss B		
Kontrollis	Heiki Lill			
Kinnitas	Heiki Lill			
 Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Tehnikainskiit Institute of Technology		Leht: 1/1	Tähis: TA 18/140581 A 02 02 D	



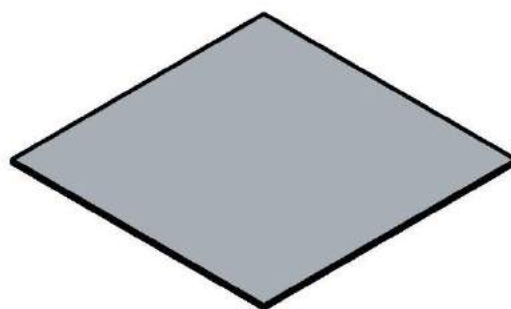
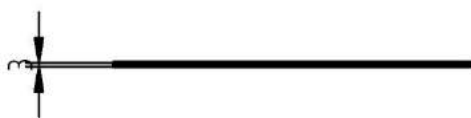
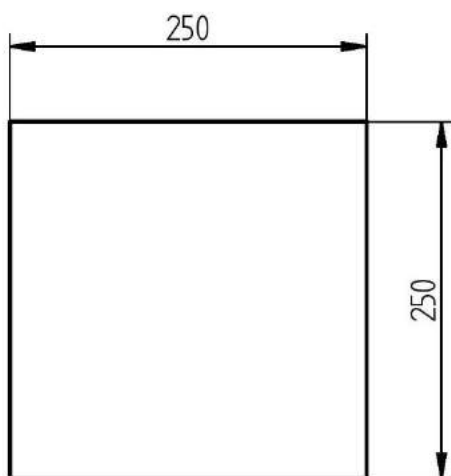
	Materjal: Mänd	Näitamata piirhälbed: ISO 2768 – m	Mass: 0,19 kg	Mõõt: 1:2
Teostas	Anti Samsonov	Nimetus: Nelikantpruss C		
Kontrollis	Heiki Lill			
Kinnitas	Heiki Lill			
 Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Tehnikainskiit Institute of Technology		Leht: 1/1	Tähis: TA 18/140581 A 02 03 D	



	Materjal: Mänd		Naitamata piirhälbed: ISO 2768 – m	Mass: 0,2 kg	Mööd: 1:2
Teostas	Anti Samsonov	Nimetus: Nelikantruss D			
Kontrollis	Heiki Lill				
Kinnitas	Heiki Lill				
Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Tehnikainsstituut Institute of Technology		Leht: 1/1	Tähis: TA 18/140581 A 02 04 D		



	Materjal: Vineer	Naitamata piirhalbed: ISO 2768 – m	Mass: 4 kg	Mõõt: 1:5
Teostas	Anti Samsonov	Nimetus: Põhi		
Kontrollis	Heiki Lill			
Kinnitas	Heiki Lill			
Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Tehnikainskiit Institute of Technology		Leht: 1/1	Tähis: TA 18/140581 A 02 05 D	



	Materjal: <i>Polükarbonaat</i>	Näitamata piirhälbed: <i>ISO 2768 – m</i>	Mass: <i>0,3 kg</i>	Mööd: <i>1:5</i>
Teostas	<i>Anti Samsonov</i>	Nimetus: <i>Polükarbonaat plaat</i>		
Kontrollis	<i>Heiki Lill</i>			
Kinnitas	<i>Heiki Lill</i>			
 Eesti Maaülikool <small>Estonian University of Life Sciences</small> <small>Tehnikainsstituut</small> <small>Institute of Technology</small>		Leht: <i>1/1</i>	Tähis: <i>TA 18/140581 A 02 06 D</i>	

Mina, _____,

(*autori nimi*)

sünniaeg _____,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö

_____,

(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja(d) on _____,

(*juhendaja(te) nimi*)

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____

(*allkiri*)

Tartu, _____

(*kuupäev*)

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev*)

(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev*)